

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ



Διπλωματική Εργασία

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΤΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΕΩΝ ΠΟΛΕΜΙΚΩΝ**

**ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ΓΙΑ ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ**

υπό

**ΜΠΩΚΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ**



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2005



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ**  
**ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.:	3470/1
Ημερ. Εισ.:	10-10-2005
Δωρεά:	Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός:	ΠΤ – ΜΜΒ
	2005
	ΜΠΩ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΤΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΕΩΝ ΠΟΛΕΜΙΚΩΝ  
ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ΓΙΑ ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ**

υπό

**ΜΠΩΚΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2005

© 2005 Γεώργιος Μώκος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## **Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής     Δρ. Γεώργιος Κοζανίδης  
(Επιβλέπων)           Διδάσκων Π.Δ. 407/80, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
                                 Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής   Δρ. Γεώργιος Λυμπερόπουλος  
                                 Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
                                 Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής     Δρ. Αθανάσιος Ζηλιασκόπουλος  
                                 Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
                                 Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας



## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Διδάσκων Π.Δ. 407/80 κ. Γεώργιο Κοζανίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμον στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Γεώργιο Λυμπερόπουλο καθώς και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Αθανάσιο Ζηλιασκόπουλο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Ευχαριστώ τους φίλους μου Μουρούτσο Γιώργιο, Δουλγεράκη Χάρη, Κουτρομπίνα Βασίλη, Τυροθουλάκη Άρη, Τζαμτζή Σπύρο, Κλέπκο Κωνσταντίνο, Σταγιάνο Δημήτρη και Κανακάρη Ευγενία για την ηθική υποστήριξή τους καθώς και για τις αμέτρητες υπέροχες στιγμές που περάσαμε μαζί τα τελευταία πέντε χρόνια. Επίσης, ευχαριστώ την Κωστίκα Μαρίτα για την κατανόησή της, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των τελευταίων μηνών της προσπάθειάς μου καθώς και για τις πολλές όμορφες στιγμές που περάσαμε. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμον στους γονείς μου, Δημήτριο και Σταυρούλα Μώκου καθώς και στον αδερφό μου Χαράλαμπο Μώκο για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την εργασία στην μητέρα μου και στον πατέρα μου.

Γεώργιος Μώκος

# **ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΤΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΕΩΝ ΠΟΛΕΜΙΚΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ΓΙΑ ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ**

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΠΩΚΟΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2005

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Κοζανίδης Γεώργιος, Διδάσκων Π.Δ. 407/80

## **Περίληψη**

Κάθε αεροσκάφος, στρατιωτικό ή εμπορικό, πρέπει να ακινητοποιηθεί για συντήρηση μετά από έναν ορισμένο αριθμό ωρών πτήσης από την τελευταία συντήρησή του. Ο σχεδιασμός πτήσεων και συντηρήσεων των στρατιωτικών αεροσκαφών εξετάζει το πρόβλημα απόφασης, σχετικά με το ποια διαθέσιμα αεροσκάφη θα πετάξουν και για πόσο καιρό καθώς και για το ποια από τα ακινητοποιημένα αεροσκάφη θα εκτελέσουν διαδικασίες συντήρησης, σε μια ομάδα αεροσκαφών που διαμορφώνουν μια μονάδα μάχης. Ο στόχος είναι να επιτευχθεί η μέγιστη διαθεσιμότητα της μονάδας εντός του ορίζοντα σχεδιασμού. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, αναπτύσσουμε ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για το πρόβλημα σχεδιασμού πτήσεων και συντηρήσεων, και επεξηγούμε την εφαρμογή του και την επίλυση του σε ένα πραγματικό πρόβλημα που προέρχεται από την Ελληνική Πολεμική Αεροπορία. Ολοκληρώνουμε με το σχολιασμό του μοντέλου ο οποίος βασίστηκε στην ανάλυση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν.

## Πίνακας Περιεχομένων

<b>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο.....	1
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	5
1.3 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας.....	8
<b>Κεφάλαιο 2 Το Πρόβλημα Σχεδιασμού Πτήσεων και Συντηρήσεων</b>	
<b>Αεροσκαφών.....</b>	<b>10</b>
2.1 Γενικά.....	10
2.2 Περιγραφή του Προβλήματος.....	11
2.3 Παρουσίαση Αρχικού Μοντέλου Σχεδιασμού Πτήσεων και Συντηρήσεων Α/Φ.....	16
2.4 Συμπεράσματα.....	22
<b>Κεφάλαιο 3 Παρουσίαση και Ανάλυση Μοντέλου Σχεδιασμού Πτήσεων και</b>	
<b>Συντηρήσεων Αεροσκαφών.....</b>	<b>24</b>
3.1 Γενικά.....	24
3.2 Μοντέλο Σχεδιασμού Πτήσεων και Συντηρήσεων Α/Φ.....	25
3.3 Ανάλυση Περιορισμών Μοντέλου Σχεδιασμού Πτήσεων και Συντηρήσεων Α/Φ.....	30
3.4 Συμπεράσματα.....	35



<b>Κεφάλαιο 4</b>	<b>Μετάβαση από το Αρχικό στο Νέο Μοντέλο.....</b>	<b>36</b>
4.1	Γενικά.....	36
4.2	Διαδικασίες Βελτίωσης.....	36
4.2.1	1 <sup>η</sup> Διαδικασία.....	36
4.2.2	2 <sup>η</sup> Διαδικασία.....	39
4.2.3	3 <sup>η</sup> Διαδικασία.....	40
4.2.4	4 <sup>η</sup> Διαδικασία.....	42
4.3	Συμπεράσματα.....	42
<b>Κεφάλαιο 5</b>	<b>Εφαρμογή του Μοντέλου.....</b>	<b>44</b>
5.1	Γενικά.....	44
5.2	Εφαρμογή Μοντέλου Σχεδιασμού Πτήσεων και Συντηρήσεων Α/Φ..	45
5.3	Συνέχεια Μοντέλου Σχεδιασμού Πτήσεων και Συντηρήσεων Α/Φ.....	66
5.4	Συμπεράσματα.....	73
<b>5.5</b>	<b>Κεφάλαιο 6 Σχολιασμός-Συμπεράσματα Μοντέλου Σχεδιασμού Πτήσεων και Συντηρήσεων Αεροσκαφών.....</b>	<b>74</b>
6.1	Γενικά.....	74
6.2	Καταλληλότητα της Αντικειμενικής Συνάρτησης.....	74
6.3	Ευελιξία του Μοντέλου.....	77
6.4	Υπολογιστική Εμπειρία.....	78

6.5	Συμπεράσματα-Προτάσεις για Μελλοντική Βελτίωση.....	79
	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>81</b>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο

Η στρατιωτική και εμπορική αεροπορική βιομηχανία έχουν διάφορες ομοιότητες, αλλά επίσης και σημαντικές διαφορές. Η ασφάλεια είναι ο σημαντικότερος παράγοντας και στις δύο βιομηχανίες, εντούτοις, ενώ η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους είναι συχνά ο κύριος στόχος στην εμπορική αεροπορική βιομηχανία, η μεγιστοποίηση της ετοιμότητας να ανταποκριθεί σε εξωτερικές απειλές είναι συνήθως ο κεντρικός στόχος στη στρατιωτική αεροπορική βιομηχανία. Τα προβλήματα που έχουν να κάνουν με πολεμικά αεροσκάφη, επομένως, πρέπει να αντιμετωπίζονται γενικά διαφορετικά από τα παραδοσιακά προβλήματα που προκύπτουν στην εμπορική αεροπορική βιομηχανία.

Ένα σημαντικό μέρος του συνολικού λειτουργικού κόστους ενός στόλου αεροσκαφών δαπανάται για τη συντήρηση των αεροσκαφών. Στην εμπορική αεροπορική βιομηχανία, υπάρχουν τέσσερα διαφορετικά επίπεδα συντήρησης, που διαφέρουν το ένα από το άλλο στη φιλοσοφία, στη διάρκεια και στη συχνότητα που εμφανίζονται :

- **Έλεγχος τύπου "Α"**: Αυτός ο έλεγχος εκτελείται κάθε 65-100 ώρες πτήσης ή μία φορά την εβδομάδα. Περιλαμβάνει την επιθεώρηση όλων των σημαντικών εξαρτημάτων και των συστημάτων των αεροσκαφών, όπως του συστήματος προσγείωσης, των μηχανών και των επιφανειών ελέγχου.

- **Έλεγχος τύπου "Β"**: Αυτός ο έλεγχος εκτελείται κάθε 300-600 ώρες πτήσης

και περιλαμβάνει τη λίπανση όλων των κινούμενων μερών καθώς και λεπτομερή οπτική δοκιμή διάφορων εξαρτημάτων, όπως του οπίσθιου φτερού και των επιφανειών κλίσεων. Και οι δύο παραπάνω τύποι ελέγχων διενεργούνται συνήθως τη νύχτα έτσι ώστε το αεροσκάφος να είναι διαθέσιμο το επόμενο πρωί. Εάν ο απαραίτητος εξοπλισμός είναι διαθέσιμος, τότε οι έλεγχοι τύπου "Α" και "Β" εκτελούνται συνήθως στη βάση όπου ανήκει το αεροσκάφος.

• **Έλεγχοι Τύπου "C" και "D"** : Αυτοί είναι περισσότερο δαπανηροί έλεγχοι σε κόστος και σε χρονική διάρκεια και εκτελούνται κάθε ένα και τέσσερα έτη αντίστοιχα. Οι έλεγχοι αυτοί απαιτούν την ακινητοποίηση των αεροσκαφών για αρκετές εβδομάδες. Έλεγχοι τύπου "C" και "D" εκτελούνται μόνο σε συγκεκριμένες εγκαταστάσεις που έχουν τον απαραίτητο εξοπλισμό και την τεχνογνωσία.

Αντίθετα, τα πρότυπα ασφάλειας που χρησιμοποιούνται στη πολεμική αεροπορία διαφορετικών χωρών είναι συνήθως παρόμοια, δεδομένου ότι καθορίζονται συχνά από τον κατασκευαστή. Τα πολεμικά αεροσκάφη συνήθως ταξινομούνται σύμφωνα με τον τύπο τους ή την αποστολή που μπορούν να ολοκληρώσουν. Τέτοιες τυπικές αποστολές είναι αναγνώριση και αναχαίτιση εχθρικών αεροσκαφών, βομβαρδισμός, κ.λπ.... Κάθε αεροσκάφος πρέπει να υποβληθεί σε έναν κανονικό έλεγχο συντήρησης μόλις φθάσει σε έναν ορισμένο αριθμό ωρών πτήσης από την τελευταία συντήρησή του. Υπάρχουν επίσης περιορισμοί σχετικά με το συνολικό χρονικό πλαίσιο καθώς και με τον αριθμό απογειώσεων αλλά αυτοί χρησιμοποιούνται σπάνια στην πράξη, επειδή οι χρονικοί περιορισμοί πτήσης προκύπτουν συνήθως συντομότερα. Η Ελληνική Πολεμική Αεροπορία υποστηρίζεται από ένα πρόγραμμα συντήρησης τριών επιπέδων ως εξής :

• **1<sup>ο</sup> επίπεδο συντήρησης (οργανωτικό επίπεδο):** Διενεργείται στη βάση, περιλαμβάνει την επιθεώρηση, επισκευή και αντικατάσταση μερών του αεροσκάφους.

• **2<sup>ο</sup> επίπεδο συντήρησης (ενδιάμεσο επίπεδο):** Διενεργείται στη βάση, περιλαμβάνει πιο λεπτομερή επιθεώρηση, επισκευή και αντικατάσταση μερών του αεροσκάφους από το 1<sup>ο</sup> επίπεδο συντήρησης.

• **3<sup>ο</sup> επίπεδο συντήρησης - συντήρηση του κατασκευαστή (επίπεδο αποθηκών):** Διενεργείται σε ειδικές εγκαταστάσεις από ειδικά εκπαιδευμένους επαγγελματίες. Περιλαμβάνει μια πιο λεπτομερή διαδικασία επισκευής και αντικατάστασης μερών του αεροσκάφους από τα άλλα δύο επίπεδα.

Ο σχεδιασμός πτήσεων και συντηρήσεων των πολεμικών αεροσκαφών εξετάζει το πρόβλημα απόφασης σχετικά με το ποια διαθέσιμα αεροσκάφη θα πετάξουν και για πόσο καιρό και ποια από τα ακινητοποιημένα αεροσκάφη θα εκτελέσουν διαδικασίες συντήρησης, σε μια ομάδα αεροσκαφών που διαμορφώνουν μια μονάδα μάχης. Ο στόχος είναι να επιτευχθεί η μέγιστη διαθεσιμότητα της μονάδας στον ορίζοντα σχεδιασμού. Αυτό είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα λήψεων αποφάσεων στη πολεμική αεροπορική βιομηχανία. Ο μεγάλος αριθμός των παραμέτρων αυξάνει τη πολυπλοκότητα του προβλήματος και του χρόνου που είναι απαραίτητος για να βρεθεί η βέλτιστη λύση.

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, βελτιώνουμε ένα μοντέλο σχεδιασμού πτήσεων και συντηρήσεων αεροσκαφών που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Ειδίκευσης του τμήματος των Μηχανολόγων

Μηχανικών Βιομηχανίας υπό τον Χρήστο Πιτσίλκα, και επεξηγούμε την εφαρμογή του σε μια πραγματική περίπτωση που προέρχεται από την Ελληνική Πολεμική Αεροπορία. Παρόλο που αυτή είναι μια πολεμική εφαρμογή, η εφαρμογή του μοντέλου επεκτείνεται σε αρκετές μη-πολεμικές περιπτώσεις, όπως ο σχεδιασμός για πυροσβεστικά αεροσκάφη, σωστικά ελικόπτερα, κλπ...

Οι διαφορές αυτού του προβλήματος με παρόμοια προβλήματα που εξετάζονται στην εμπορική αεροπορική βιομηχανία, είναι αρκετές. Η πρώτη διαφορά εμφανίζεται στην επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία, για πολεμικές εφαρμογές, εστιάζει στη διαθεσιμότητα του στόλου, μιας και οι σχετικές αποφάσεις δεν είναι αποκλειστικά βασισμένες σε οικονομικούς όρους. Στην πραγματικότητα, οι περιληφθείσες δαπάνες ενσωματώνονται μόνο έμμεσα. Επιπλέον, οι απαιτήσεις πτήσεων εκφράζονται ως συνολικός χρόνος τον οποίον όλα τα αεροσκάφη πρέπει να συμπληρώσουν και όχι ως συγκεκριμένες πτήσεις που πρέπει να πραγματοποιηθούν, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της εμπορικής αεροπορικής βιομηχανίας. Τέλος, σε πολεμικές εφαρμογές, ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στους υπολειπόμενους χρόνους που τα αεροσκάφη μπορούν να πετάξουν πριν χρειαστεί να υποβληθούν σε κανονική συντήρηση (υπολειπόμενοι χρόνοι πτήσης), μιας και το ζήτημα του σχεδιασμού των πτήσεων και των συντηρήσεων εξαρτάται έντονα από αυτές τις ποσότητες.

Η συνεισφορά αυτής της διπλωματικής εργασίας έγκειται στο ότι το μοντέλο που αναπτύχθηκε έχει μια βασική διαφοροποίηση σε σχέση με αυτά που έχουν αναπτυχθεί μέχρι τώρα. Η διαφοροποίησή του είναι ότι έχει την τάση να αποτελέσει έναν οδηγό πτητικής εκμετάλλευσης των αεροσκαφών μιας αεροπορικής μονάδας με γνώμονα τον καλύτερο δυνατό σχεδιασμό των συντηρήσεων των αεροσκαφών μέσα



από τους περιορισμούς που αυτή διέπεται.

Διατυπώνουμε το πρόβλημα ως μεικτό γραμμικό ακέραιο πρόγραμμα, όπου η ετοιμότητα απόκρισης σε εξωτερικές απειλές μεγιστοποιείται στην αντικειμενική συνάρτηση. Η λύση του μοντέλου παρέχει ένα βέλτιστο σχέδιο που ικανοποιεί τις απαιτήσεις πτήσεων και συντηρήσεων. Εκτός από την εξέταση της συμπεριφοράς του μοντέλου, καταδεικνύουμε επίσης την ευελιξία του και τις δυνατότητες εφαρμογής του.

### *1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση*

Διάφορα προβλήματα προγραμματισμού αεροσκαφών έχουν διερευνηθεί στο παρελθόν. Οι Kurokawa και Takeshita [15], πρότειναν μια μέθοδο νευρο-δικτύων για τον σχεδιασμό εναέριων μεταφορών της Ιαπωνικής Αμυντικής Αεροπορίας. Η μέθοδος χωρίζει το κύριο πρόβλημα σε τρία υποπροβλήματα τα οποία λύνονται διαδοχικά.

Οι Clarke et al. [4], εισήγαγαν ένα μοντέλο προγραμματισμού αεροσκαφών το οποίο περιλαμβάνει εκτιμήσεις τόσο για τις συντηρήσεις όσο και για τα πληρώματα των αεροσκαφών. Οι Rushmeier και Kontogiorgis [17], παρουσίασαν ένα μεικτό ακέραιο μοντέλο ροής πολλαπλών οντοτήτων για την ανάθεση στόλου αεροσκαφών μεγάλης κλίμακας υποκείμενη σε ποικίλους περιορισμούς. Οι Clarke et al. [5], ανέπτυξαν μια μαθηματική μορφοποίηση για το πρόβλημα κυκλικής εναλλαγής αεροσκαφών και το έλυσαν με χαλάρωση Lagrange και subgradient βελτιστοποίηση.

Οι Dijkstra et al. [6], εξέτασαν το πρόβλημα του προγραμματισμού του προσωπικού συντήρησης των αεροσκαφών της KLM. Οι Keskinocak και Tayur [13], εξέτασαν ένα πρόβλημα προγραμματισμού αεροσκαφών, στο οποίο τα αιτήματα των πελατών φθάνουν δυναμικά. Οι Barnhart et al. [2], παρουσίασαν ένα μοντέλο και μια προσεγγιστική λύση για να λύσουν ταυτόχρονα τα προβλήματα δρομολόγησης και ανάθεσης στόλου αεροσκαφών. Οι Gopalan και Talluri [12], ερεύνησαν τα μοντέλα και τις τεχνικές επίλυσης για διάφορα προβλήματα αερογραμμών τα οποία περιλαμβάνουν αποφάσεις για την δρομολόγηση, την ανάθεση και τη συντήρηση στόλου αεροσκαφών.

Οι Feo και Bard [8], διαμόρφωσαν το πρόβλημα της δρομολόγησης της συντήρησης ως καθορισμένο διακριτό πρόβλημα και χρησιμοποίησαν ευρετικούς αλγορίθμους για να διαμορφώσουν τις δρομολογήσεις της συντήρησης. Συνδύασαν επίσης το πρόβλημα δρομολόγησης με το πρόβλημα εντοπισμού των βάσεων συντήρησης. Οι Gopalan και Talluri [11] και ο Talluri [21] ερεύνησαν το πρόβλημα της βέλτιστης δρομολόγησης ενός αεροσκάφους, εξασφαλίζοντας συγχρόνως ότι ορισμένες βραχυπρόθεσμες απαιτήσεις συντήρησης καλύπτονται.

Οι Graves et al. [10], μελέτησαν το πρόβλημα της ανάθεσης μελών του πληρώματος σε προγραμματισμένες πτήσεις. Οι Klabjan et al. [14], εξέτασαν σύνθετα προβλήματα τα οποία περιλαμβάνουν τον σχεδιασμό του προγράμματος, την δρομολόγηση αεροσκαφών και τον προγραμματισμό του πληρώματος. Στην εργασία τους, ο χρόνος αναχώρησης μιας πτήσης μπορούσε να αλλάξει ελαφρώς, εφόσον παρέμενε μέσα σε ένα ορισμένο χρονικό περιθώριο. Οι Sriram και Haghani [18], παρουσίασαν μια μορφοποίηση για τα προβλήματα προγραμματισμού συντήρησης

καθώς και μια ευρετική προσέγγιση για να λύσουν το πρόβλημα. Οι Samaranyake et al. [19] τεκμηρίωσαν την εφαρμογή μιας δομής λογισμικού για τη διαχείριση των μεγάλης κλίμακας δραστηριοτήτων συντήρησης αεροσκαφών.

Οι Yan και Lin [22], μελέτησαν το πρόβλημα του καθορισμού εναλλακτικών προγραμμάτων αεροσκαφών σε περίπτωση προσωρινού κλεισίματος αερολιμένων. Ο Arguello και οι λοιποί [1], μελέτησαν μοντέλα και μεθόδους για δυναμική διαχείριση των διαδικασιών αερογραμμών σε περίπτωση ανώμαλων καταστάσεων.

Οι Ernst et al. [7], ανέπτυξαν έναν εξειδικευμένο αλγόριθμο της μεθόδου simplex για το πρόβλημα του προγραμματισμού των προσγειώσεων των αεροσκαφών σε έναν ή περισσότερους αεροδιαδρόμους με ποινές πρωιμότητας και καθυστέρησης. Οι Beasley et al. [3] παρουσίασαν μια μικτή ακέραια μορφοποίηση για ένα παρόμοιο πρόβλημα με έναν μόνο αεροδιάδρομο και το επέκτειναν στην περίπτωση των πολλαπλών αεροδιαδρόμων.

Τέλος, οι Qi et al. [16] παρουσίασαν ένα μοντέλο για το προγραμματισμό εκπαίδευσης πιλότων, όπου η συνολική σταθμισμένη διάρκεια όλων των κλάσεων ελαχιστοποιείται στην αντικειμενική συνάρτηση. Το πρόβλημα λύνεται με έναν αλγόριθμο Branch-and-Bound και μια οικογένεια ευρεστικών αλγορίθμων.

Η ανωτέρω συζήτηση καταδεικνύει ότι η βιβλιογραφία που αφορά τις διαδικασίες αερογραμμών είναι αρκετά πλούσια. Εντούτοις, καμία από τις ανωτέρω εργασίες δεν εξετάζει το συγκεκριμένο πρόβλημα που εξετάζουμε σε αυτήν την εργασία. Απ' όσο γνωρίζουμε, μια τέτοια εργασία δεν έχει δημοσιευθεί μέχρι τώρα στη σχετική βιβλιογραφία. Πιστεύουμε ότι αυτό είναι ένα πολύ ενδιαφέρον πρόβλημα που απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, λόγω της σοβαρότητας των σχετικών

ζητημάτων και του σοβαρού αντίκτυπου που οι ληφθείσες αποφάσεις μπορούν να έχουν.

### *1.3 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας*

Το υπόλοιπο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι δομημένο σε πέντε ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαια 2 - 6, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα :

Στο Κεφάλαιο 2, παραθέτουμε λεπτομερώς την περιγραφή του προβλήματος, το αρχικό μοντέλο που καλούμαστε να βελτιώσουμε καθώς και μια αναλυτική περιγραφή των παραμέτρων και των μεταβλητών απόφασης αυτού. Επίσης παρατίθενται μερικά συμπεράσματα για τον σκοπό για τον οποίο φτιάχτηκε αυτό το μοντέλο.

Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζουμε το μοντέλο που προέκυψε από την βελτίωση του αρχικού, το οποίο ήταν και ο σκοπός της εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας. Ως εκ τούτου, ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των περιορισμών του μοντέλου καθώς και σχόλια πάνω σε αυτό.

Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται βήμα προς βήμα οι ενέργειες που έγιναν για να ξεπεραστούν τα προβλήματα που προέκυπταν από την εφαρμογή του αρχικού μοντέλου. Αυτές οι ενέργειες μας οδήγησαν σε σημαντικές βελτιώσεις του αρχικού μοντέλου έτσι ώστε να μιλάμε για ένα καινούριο μοντέλο με σαφώς μεγαλύτερο όγκο από το αρχικό, που όμως έχει τη βάση του σε αυτό.

Στο κεφάλαιο 5, εφαρμόζουμε το μοντέλο που αναπτύξαμε σε μια πραγματική

περίπτωση (πραγματικά αριθμητικά δεδομένα) έτσι ώστε να εξετάσουμε τη συμπεριφορά του. Ακολουθεί η συλλογή των αποτελεσμάτων και ανάλυση αυτών έτσι ώστε να γίνει κατανοητή η λειτουργία του μοντέλου. Έπειτα αφιερώνουμε ένα υποκεφάλαιο στην περιγραφή μιας «ιδιότητας» του μοντέλου που αναφέρεται ως ‘Συνέχεια’. Κλείνουμε το κεφάλαιο αυτό με κάποια συμπεράσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6, εμβαθύνουμε στο «εσωτερικό» του μοντέλου και σχολιάζουμε την καταλληλότητα της αντικειμενικής συνάρτησης, την ευελιξία του μοντέλου καθώς και κάποια θέματα υπολογιστικού χαρακτήρα. Στο τελευταίο υποκεφάλαιο παραθέτουμε μερικά συμπεράσματα-προτάσεις για μελλοντική βελτίωση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΤΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΕΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

### 2.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό και μάλιστα στο υποκεφάλαιο 2.2 παρουσιάζουμε τους παράγοντες που διαμορφώνουν και παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη ενός μοντέλου σχεδιασμού πτήσεων και συντηρήσεων αεροσκαφών, μιας και ο τρόπος εκμετάλλευσης του στόλου μιας αεροπορικής μονάδας είναι ένα πρόβλημα ιδιαίτερα δυναμικό με πολλές ευμετάβλητες παραμέτρους. Στην ουσία γίνεται μια αναλυτική περιγραφή του προβλήματος το οποίο αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη του μοντέλου.

Ένας από τους κύριους στόχους του μοντέλου που αναπτύχθηκε είναι ο ορθά κλιμακούμενος προγραμματισμός της συντήρησης των αεροσκαφών στον οποίο καθοριστικό ρόλο παίζουν η σωστή χρήση των αεροσκαφών και ο κατάλληλος ρυθμός πτήσεων αυτών. Κάποιοι άλλοι κύριοι παράγοντες των οποίων η επίδραση είναι ιδιαιτέρως σημαντική στον προγραμματισμό της συντήρησης των Α/Φ μιας αεροπορικής μονάδας είναι οι εξής:

- Οι δυνατότητες του φορέα παροχής συντήρησης
- Δυνατότητα εγκαταστάσεων για υποδοχή αεροσκαφών υπό συντήρηση
- Ο ρυθμός πτήσεων του κάθε αεροσκάφους
- Οι προτεραιότητες και το πτητικό έργο της αεροπορικής μονάδας

Στο υπόλοιπο αυτού του κεφαλαίου παραθέτουμε το αρχικό μοντέλο στο



υποκεφάλαιο 2.3 χωρίς να το αναλύουμε ιδιαίτεως, και το υποκεφάλαιο 2.4 το αφιερώνουμε σε κάποια συμπεράσματα για το μοντέλο που έχει ήδη αναπτυχθεί.

## 2.2 Περιγραφή του Προβλήματος

Το πρόβλημα που εξετάζεται σε αυτή τη διπλωματική εργασία προέκυψε από τη λειτουργία μιας πτέρυγας μάχης της Ελληνικής Πολεμικής Αεροπορίας. Αυτή η πτέρυγα μάχης αποτελείται από τρεις μοίρες, κάθε μία από τις οποίες χρησιμεύει ως βάση για διάφορα αεροσκάφη διαφόρων τύπων. Αυτή η ιεραρχική δομή είναι κοινή και συναντιέται συχνά στην Πολεμική Αεροπορία διαφόρων άλλων χωρών. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούμε τον όρο "πτέρυγα" για να αναφερθούμε σε όλες τις μοίρες εξεταζόμενες ως ένα σύνολο.

Η Ελληνική Πολεμική Αεροπορία διαιρείται σε τέσσερα τμήματα: την Τακτική Πολεμική Αεροπορία, την Εναέρια υποστήριξη, την υπηρεσία Εκπαίδευσης αέρος καθώς και άλλες Μονάδες/Υπηρεσίες. Όλες οι μονάδες που είναι αρμόδιες για τις επιχειρήσεις και τις αποστολές αέρος ανήκουν στο τμήμα της τακτικής Πολεμικής Αεροπορίας. Περαιτέρω, η οργανωτική δομή της Ελληνικής Πολεμικής Αεροπορίας χωρίζεται σε πτέρυγες μάχης, οι οποίες διαιρούνται σε μοίρες. Όλες οι πτέρυγες μάχης ανήκουν στο Τμήμα της Τακτικής Πολεμικής Αεροπορίας, δεδομένου ότι όλες χρησιμοποιούν αεροσκάφη.

Στην αρχή κάθε ορίζοντα σχεδιασμού, ο διοικητής της πτέρυγας εκδίδει ένα πρόγραμμα για κάθε μία μοίρα και περίοδο. Αυτά τα προγράμματα καθορίζουν το συνολικό χρόνο που όλα τα αεροσκάφη κάθε μοίρας πρέπει να πετάξουν κατά τη

διάρκεια κάθε χρονικής περιόδου. Ένα χωριστό πρόγραμμα εκδίδεται για κάθε τύπο αεροσκαφών, επειδή διαφορετικοί τύποι αεροσκαφών έχουν διαφορετικές ικανότητες πτήσης και διαφορετικές απαιτήσεις συντήρησης. Για αυτόν τον λόγο, το μοντέλο της διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε για τη χρήση ενός συγκεκριμένου τύπου αεροσκαφών. Φυσικά, το ίδιο μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί επανειλημμένα μέχρι όλα τα προγράμματα να έχουν εκδοθεί, εάν υπάρχουν περισσότεροι από ένας τύποι αεροσκαφών. Τα προγράμματα που εκδίδονται από τον διοικητή της πτέρυγας περιέχουν τιμές στόχους από τις οποίες μόνο μικρές αποκλίσεις επιτρέπονται.

Για κάθε συγκεκριμένο αεροσκάφος, ορίζουμε τον υπολειπόμενο χρόνο πτήσης ως τον συνολικό υπολειπόμενο χρόνο που το αεροσκάφος μπορεί να πετάξει έως ότου υποβληθεί σε έναν έλεγχο συντήρησης. Ο υπολειπόμενος χρόνος πτήσης ενός αεροσκάφους είναι θετικός εάν και μόνο εάν αυτό το αεροσκάφος είναι διαθέσιμο να πετάξει. Ομοίως, καθορίζουμε τον υπολειπόμενο χρόνο συντήρησης ενός αεροσκάφους σαν τον συνολικό υπολειπόμενο χρόνο που το αεροσκάφος χρειάζεται να συντηρηθεί έως ότου είναι διαθέσιμο να πετάξει ξανά. Ο υπολειπόμενος χρόνος συντήρησης ενός αεροσκάφους είναι θετικός εάν και μόνο εάν αυτό το αεροσκάφος είναι στη συντήρηση (και δεν είναι επομένως διαθέσιμο να πετάξει).

Για τις ανάγκες συντήρησης της πτέρυγας, υπάρχει ένας σταθμός συντήρησης που είναι αρμόδιος για την παροχή των υπηρεσιών συντήρησης στα αεροσκάφη της πτέρυγας. Αυτός ο σταθμός έχει συγκεκριμένη δυναμικότητα χώρου και χρόνου. Με βάση το δεδομένο πρόγραμμα για κάθε μοίρα και τους φυσικούς περιορισμούς που προέρχονται από την δυναμικότητα του συστήματος, ο στόχος είναι να εκδοθεί ένα

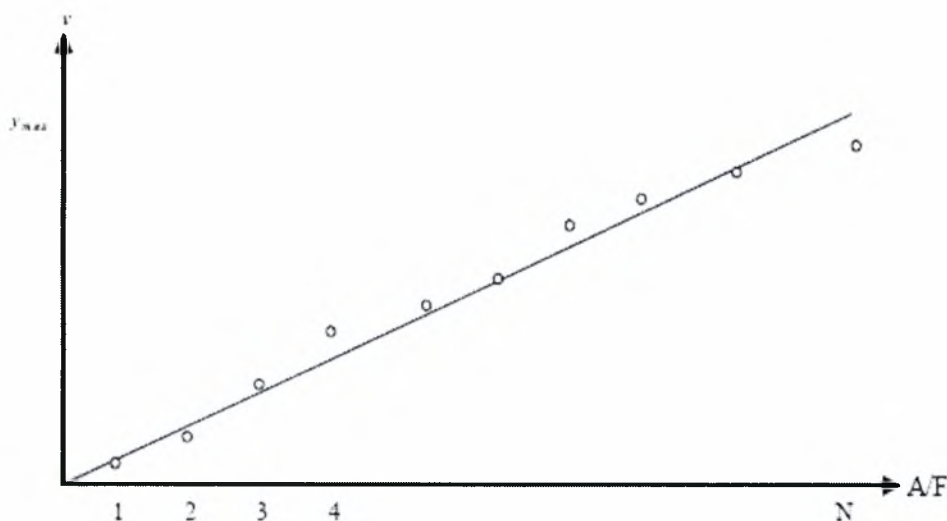
πρόγραμμα πτήσεων και συντηρήσεων για κάθε μεμονωμένο αεροσκάφος, έτσι ώστε κάποιο κατάλληλο μέτρο της απόδοσης να βελτιστοποιείται. Όπως αναφέραμε ήδη, η ετοιμότητα ανταπόκρισης σε εξωτερικές απειλές είναι το καταλληλότερο μέτρο απόδοσης για τέτοιες εφαρμογές. Αυτή η ετοιμότητα εξαρτάται από το συνολικό αριθμό αεροσκαφών που είναι διαθέσιμα να πετάξουν και από το συνολικό διαθέσιμο υπολειπόμενο χρόνο πτήσης. Το μοντέλο που αναπτύξαμε ενσωματώνει και τα δύο αυτά στοιχεία. Επιπλέον, μας επιτρέπει να ελέγχουμε πώς αυτά τα στοιχεία μεταβάλλονται όχι μόνο μέσα στη πτέρυγα αλλά επίσης και σε κάθε μοίρα ξεχωριστά.

Σε οποιαδήποτε στιγμή, ο συνολικός υπολειπόμενος χρόνος πτήσης μιας μοίρας είναι ίσος με το άθροισμα των υπολειπόμενων χρόνων πτήσης όλων των αεροσκαφών που ανήκουν σε αυτήν την μοίρα. Ο συνολικός υπολειπόμενος χρόνος πτήσης της πτέρυγας είναι ίσος με το σύνολο των υπολειπόμενων χρόνων πτήσης όλων των μοιρών. Διαισθητικά καταλαβαίνουμε, ότι υπάρχουν πολλοί πιθανοί συνδυασμοί υπολειπόμενων χρόνων πτήσης μεμονωμένων αεροσκαφών που μπορούν να οδηγήσουν στον ίδιο συνολικό υπολειπόμενο χρόνο πτήσης μοιρών ή πτερύγων. Επιπλέον, δεν είναι επαρκές το να ορίζουμε τη διαθεσιμότητα ως το συνολικό αριθμό αεροσκαφών που είναι διαθέσιμα στη πτέρυγα, μόνο και μόνο, επειδή αυτός ο ορισμός δεν δίνει καμία πληροφορία για τον τρόπο που ο συνολικός υπολειπόμενος χρόνος πτήσης κατανέμεται στα αεροσκάφη και τις μοίρες.

Θεωρούμε ένα 2-διάστατο διάγραμμα (Σχήμα 1), στο οποίο ο κάθετος άξονας αντιπροσωπεύει τον υπολειπόμενο χρόνο πτήσης που μετριέται σε κάποιες κατάλληλες μονάδες και ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει το δείκτη των

αεροσκαφών κατά αύξουσα σειρά, σε σχέση με τους υπολειπόμενους χρόνους πτήσης τους, με  $l$  να είναι ο δείκτης του αεροσκάφους με τον μικρότερο υπολειπόμενο χρόνο και  $N$  να είναι ο δείκτης του αεροσκάφους με το μεγαλύτερο υπολειπόμενο χρόνο ( $N$  είναι ο συνολικός αριθμός αεροσκαφών). Θεωρούμε επίσης το ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει την αρχή των αξόνων με το σημείο με τις συντεταγμένες  $(N, y_{\max})$ , όπου  $y_{\max}$  είναι ο μέγιστος χρόνος που ένα αεροσκάφος μπορεί να πετάξει μεταξύ δύο διαδοχικών συντηρήσεων. Με την απεικόνιση κάθε αεροσκάφους σε αυτήν την γραφική παράσταση, μπορούμε να οπτικοποιήσουμε τη συνολική διαθεσιμότητα της μοίρας ή της πτέρυγας, ανάλογα σε ποια εκ των δύο η γραφική παράσταση αναφέρεται.

Ένας δείκτης χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ομαλότητα της κατανομής του συνολικού υπολειπόμενου χρόνου πτήσης μεταξύ των αεροσκαφών. Αυτός ο δείκτης είναι ίσος με το σύνολο των κάθετων αποστάσεων (αποκλίσεις) κάθε σημείου που απεικονίζει ένα μεμονωμένο αεροσκάφος από το ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει την αρχή των αξόνων με το σημείο  $(N, y_{\max})$ . Όσο μικρότερο είναι αυτό το σύνολο, τόσο ομαλότερη είναι η κατανομή του συνολικού υπολειπόμενου χρόνου πτήσης. Ιδανικά, ο δείκτης είναι ίσος με 0, οπότε σε αυτή την περίπτωση όλα τα σημεία βρίσκονται στο ευθύγραμμο τμήμα. Κατά την έκδοση των μεμονωμένων σχεδίων, η πρόθεση είναι να κρατηθεί κάθε σημείο όσο το δυνατόν πιο κοντά στο ευθύγραμμο τμήμα, έτσι ώστε αυτές οι αποκλίσεις να παραμένουν μικρές. Μέχρι σήμερα, αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται για να εκδοθεί το πρόγραμμα πτήσεων και συντηρήσεων των μεμονωμένων αεροσκαφών στη πτέρυγα μάχης που μελετούμε.



**Σχήμα 1:Οπτική αναπαράσταση του υπολειπόμενου χρόνου πτήσης των αεροσκαφών**

Από τη χρήση της τεχνικής που περιγράφεται ανωτέρω προκύπτουν μερικά απλά συμπεράσματα. Καταρχήν, παρέχεται πάντα ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών υπολειπόμενων χρόνων πτήσης αεροσκαφών. Επιπλέον, καθιερώνεται μια ομαλή ακολουθία, που καθορίζει τη σειρά με την οποία τα αεροσκάφη πρέπει να επισκεφτούν το σταθμό συντήρησης. Αυτό μας εξυπηρετεί γιατί αποφεύγουμε στη συνέχεια τη συμφόρηση στο σταθμό συντήρησης και εξασφαλίζεται μια ομαλή χρησιμοποίηση του σταθμού συντήρησης.

Όπως αναφέρθηκε ήδη, η χρονική διαθεσιμότητα πτήσης είναι ίση με το σύνολο όλων των υπολειπόμενων χρόνων πτήσης των αεροσκαφών μεν, αλλά υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί υπολειπόμενων χρόνων πτήσης που μπορούν να οδηγήσουν στην ίδια συνολική διαθεσιμότητα. Για να κατανοηθεί αυτό καλύτερα, θεωρήστε ένα πρόβλημα με τέσσερα αεροσκάφη κάθε ένα από τα όποια μπορεί να

πετάζει ένα μέγιστο 120 ωρών μεταξύ δύο διαδοχικών συντηρήσεων. Για μια συνολική χρονική διαθεσιμότητα πτήσης 300 ωρών, ένας πιθανός συνδυασμός των υπολειπόμενων χρόνων πτήσης είναι 30-30-120-120 και άλλος ένας είναι 30-60-90-120. Για την τεχνική που περιγράφεται ανωτέρω, η δεύτερη κατανομή είναι προτιμότερη επειδή εξασφαλίζει ομαλή ροή των αεροσκαφών, δηλαδή μία ομαλή χρησιμοποίηση των χρόνων πτήσης αεροσκαφών και του σταθμού συντήρησης.

### 2.3 Παρουσίαση του Αρχικού Μοντέλου Σχεδιασμού Πτήσης και Συντήρησης Αεροσκαφών

Για να υπάρξει πλήρης κατανόηση του αρχικού μοντέλου παρακάτω παρουσιάζονται και αναλύονται όλα τα δεδομένα και οι παράμετροι του προβλήματος.

Στο αρχικό μας μοντέλο θεωρούμε μια αεροπορική μονάδα που αποτελείται από  $M$  αριθμό μοιρών και κάθε μία από αυτές αποτελείται από  $N$  αριθμό αεροσκαφών. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι η αεροπορική μονάδα αποτελείται από ένα συγκεκριμένο τύπο αεροσκαφών  $n$  για τον οποίο ισχύουν κάποια δεδομένα που έχουν να κάνουν με :

- Τον χρόνο τον οποίο ένα αεροσκάφος μπορεί να πετάζει από τη στιγμή που βγήκε από τη συντήρηση μέχρι και την επόμενη είσοδο του στη συντήρηση. Ο χρόνος αυτός λέγεται χρόνος μεταξύ των επιθεωρήσεων, συμβολίζεται με  $Y_o$  και λαμβάνεται ίσος με 300 ώρες. Ο χρόνος που υπολείπεται σε ένα αεροσκάφος μέχρι την είσοδο του στη συντήρηση συμβολίζεται με  $y$ .



- Τον αρχικό διαθέσιμο χρόνο πτήσης κάθε αεροσκάφους μέχρι την είσοδο του στη συντήρηση, κατά την έναρξη εφαρμογής του προγράμματος. Ο χρόνος αυτός συμβολίζεται με  $Y_i$  και διαφέρει ανάλογα με την μελέτη περίπτωσης. Δεν μπορεί όμως να υπερβαίνει τις 300 ώρες.

- Τον χρόνο παραμονής του αεροσκάφους στη συντήρηση ή αλλιώς τις απαιτούμενες εργατώρες συντήρησης του. Ο χρόνος αυτός συμβολίζεται με  $g$ . Ο αρχικός χρόνος παραμονής του στη συντήρηση μετά την είσοδο σε αυτή συμβολίζεται με  $G_o$  και λαμβάνεται ίσος με 320 ώρες.

Βέβαια εκτός από τον τύπο του αεροσκάφους, ισχύουν και κάποιοι περιορισμοί που βασίζονται στις δυνατότητες συντήρησης της αεροπορικής μονάδας και οι οποίοι είναι :

- Η δυνατότητα παροχής συντήρησης σε εργατώρες η οποία συμβολίζεται με  $B$ . Ο χρόνος αυτός μεταβάλλεται για κάθε περίοδο  $T$  και εξαρτάται από παράγοντες που έχουν να κάνουν με μετακινήσεις προσωπικού, περιόδους αδειών, αργίες και εορτές.

- Οι εργατώρες, που τελικά απασχολήθηκε η συντήρηση στο κάθε αεροσκάφος ανά περίοδο  $T$ , συμβολίζονται με  $h$ .

- Η δυνατότητα υποδοχής αεροσκαφών υπό συντήρηση σε χώρους υπόστεγων  $C_o$  (capacity).

Επιπλέον, λαμβάνεται σαν περιορισμός η απαίτηση υλοποίησης του πτητικού έργου της αεροπορικής μονάδας  $A$ , με μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση. Το πρόβλημα

μας αποτελεί έναν οδηγό πτητικής εκμετάλλευσης  $x$  (ή ώρες πτήσης) του κάθε αεροσκάφους  $n$  για την κάθε περίοδο  $T$ , με γνώμονα τον καλύτερο δυνατό προγραμματισμό της συντήρησης του μέσα από την ικανοποίηση των περιορισμών που τη διέπουν. Επίσης, λαμβάνεται υπόψη ο μέσος ελάχιστος διαθέσιμος χρόνος πτήσης που απομένει στα αεροσκάφη της κάθε Μοίρας ανά περίοδο  $T$  μέχρι την είσοδο τους στη συντήρηση και συμβολίζεται με  $J_o$ . Ο όρος αυτός αποτελεί το λεγόμενο **FLEET TIME**, και είναι ένας σημαντικός δείκτης σωστής λειτουργίας μιας αεροπορικής μονάδας όσον αφορά τον προγραμματισμό των πτήσεων.

Στην προσπάθεια επίλυσης του μοντέλου, ορίστηκαν κάποιες δυαδικές μεταβλητές. Έτσι η μεταβλητή  $a$  παίρνει την τιμή 1 αν το Α/Φ είναι πτήσιμο την χρονική περίοδο  $T$ , ή αλλιώς την τιμή 0. Οι μεταβλητές  $d, f$  χρησιμοποιήθηκαν για τις χρονικές περιόδους που το Α/Φ εξέρχεται ή εισέρχεται στη συντήρηση αντίστοιχα, είναι επίσης δυαδικές και οι τιμές τους ορίζονται με τη βοήθεια της μεταβλητής  $a$ . Την παράμετρο  $BIG$  τη θεωρούμε ίση με μια μεγάλη τιμή (100.000), ώστε να μην επηρεάσει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Από τα αποτελέσματα της εφαρμογής γίνονται γνωστές οι τιμές των  $d, f$  οπότε είναι δυνατός και ο υπολογισμός της βέλτιστης τιμής.

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, είναι η μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας της κάθε Μοίρας, η μεγιστοποίηση δηλαδή των Α/Φ που δύναται να πετάξουν και δεν βρίσκονται υπό συντήρηση για κάθε περίοδο  $T$ . Σαν περίοδο  $T$  θεωρείται ένας μήνας.

Η μαθηματική μορφοποίηση του αρχικού μοντέλου είναι η ακόλουθη :



**α. Μεταβλητές απόφασης μοντέλου :**

- $x$  : Ώρες πτήσης ανά Α/Φ για κάθε περίοδο  $T$ ,
- $y$  : Υπολειπόμενες ώρες πτήσης, μέχρι την είσοδο στη συντήρηση, ανά Α/Φ για κάθε περίοδο  $T$ ,
- $g$  : Υπολειπόμενες εργατώρες συντήρησης, μέχρι την έξοδο από αυτή, ανά Α/Φ για κάθε περίοδο  $T$ ,
- $h$  : Εργατώρες που εργάστηκε η συντήρηση ανά Α/Φ για κάθε περίοδο  $T$ ,
- $a$  : Δυαδική μεταβλητή που μας δείχνει την κατάσταση του Α/Φ ( 0 - υπό συντήρηση, 1- δύναται να πετάξει ), ανά Α/Φ για κάθε περίοδο  $T$ ,
- $d$  : Βοηθητική δυαδική μεταβλητή ανά Α/Φ για κάθε περίοδο  $T$ . Παίρνει την τιμή 1 όταν το Α/Φ εξέρχεται από τη συντήρηση, ή αλλιώς την τιμή 0,
- $f$  : Βοηθητική δυαδική μεταβλητή ανά Α/Φ για κάθε περίοδο  $T$ . Παίρνει την τιμή 1 όταν το Α/Φ εισέρχεται στη συντήρηση αλλιώς 0,
- $z$  : Βοηθητική δυαδική μεταβλητή ανά Α/Φ για κάθε περίοδο  $T$

**β. Αντικειμενική συνάρτηση μοντέλου :**

$$\text{maximize availability : } Z = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N BIG^*(d_{nmt} + f_{nmt}), \forall n, m, t$$

**γ. Παράμετροι μοντέλου :**

- $T$  : Χρονικός ορίζοντας,
- $A$  : Οι προγραμματισμένες ώρες πτήσεις ( πρόγραμμα πτήσεων ) ανά μοίρα Α/Φ για κάθε περίοδο  $T$ ,

- $B$  : Οι παρεχόμενες εργατώρες συντήρησης για το συνολικό αριθμό των Α/Φ για κάθε περίοδο  $T$ ,
- $Y_o$  : Ο μέγιστος αριθμός υπολειπόμενων ωρών πτήσης μετά από την έξοδο του Α/Φ από τη συντήρηση ανά Α/Φ για κάθε περίοδο  $T$ ,
- $G_o$  : Ο μέγιστος αριθμός υπολειπόμενων εργατωρών συντήρησης μετά την είσοδο του Α/Φ στη συντήρηση ανά Α/Φ για κάθε περίοδο  $T$ ,
- $Y_1$  : Αρχικές τιμές του  $y$  για κάθε Α/Φ την χρονική περίοδο  $t = 1$ ,
- $G_1$  : Αρχικές τιμές του  $g$  για κάθε Α/Φ την χρονική περίοδο  $t = 1$ ,
- $X_o$  : Μέγιστος αριθμός ωρών πτήσεων ανά Α/Φ ανά περίοδο  $T$ ,
- $C_o$  : Ο αριθμός των σταθμών συντήρησης,
- $J_o$  : Ελάχιστος μέσος υπολειπόμενος αριθμός ωρών πτήσης ανά Α/Φ και ανά μοίρα μέχρι την είσοδο στη συντήρηση

#### δ. Περιορισμοί μοντέλου :

- $\sum_{n=1}^N a_{mnt} \geq z$ , Ελάχιστη απαιτούμενη διαθεσιμότητα ανά Μοίρα
- $y_{mnt} = y_{mnt-1} - x_{mnt-1} + 300 * d_{mnt}$ , Υπόλοιπο ωρών πτήσης μέχρι την είσοδο στη συντήρηση για κάθε Α/Φ
- $d_{mnt+1} \geq a_{mnt+1} - a_{mnt}$  και  $d_{mnt} \leq a_{mnt}$ , Περιορισμοί για τον ορισμό του  $d$  βάσει του  $a$
- $g_{mnt} = g_{mnt-1} - h_{mnt-1} + 320 * f_{mnt}$ , Υπόλοιπο εργατωρών συντήρησης μέχρι την έξοδο από τη συντήρηση για κάθε Α/Φ και για κάθε χρονική περίοδο  $T$

- $f_{mnt+1} \geq a_{mnt} - a_{mnt+1}$  και  $f_{mnt+1} \leq a_{mnt}$  Περιορισμοί για τον ορισμό του  $f$  βάσει του  $a$
- $0.90 * A_{mt} \leq \sum_{n=1}^N x_{mnt} \leq 1.10 * A_{mt}$ , Περιορισμός προγραμματισμού ωρών πτήσεων ανά μοίρα και για κάθε χρονική περίοδο  $T$
- $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N h_{mnt} \leq B_t, \forall t$ , Δυνατότητα παροχής εργατωρών συντήρησης για κάθε χρονική περίοδο  $T$
- $0 \leq \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (1 - a_{mnt}) \leq C_0, \forall t$ , Περιορισμός στον αριθμό Α/Φ υπό συντήρηση την ίδια χρονική περίοδο
- $y_{mnt} \leq Y_0 * a_{mnt}$ , Ορισμός μέγιστης τιμής για το  $y$ . Με την προσθήκη αυτού του περιορισμού, καλύπτεται η συνθήκη  $y > 0$  τότε  $a = 1$  (δύναται να πετάξει)
- $g_{mnt} \leq G_0 * (1 - a_{mnt})$ , Ορισμός μέγιστης τιμής για το  $g$ . Με την προσθήκη αυτού του περιορισμού, καλύπτεται η συνθήκη  $g > 0$  τότε  $a = 0$  (υπό συντήρηση)
- $x_{mnt} \leq X_0$ , Μέγιστος αριθμός ωρών πτήσεων για κάθε Α/Φ ανά περίοδο  $T$
- $\sum_{n=1}^N y_{mnt} \geq J_0 * \sum_{n=1}^N a_{mnt}$ , Ελάχιστο μέσο υπολειπόμενο ωρών πτήσης Α/Φ ανά Μοίρα (FLEET TIME)
- $y_{mnt} = (if \ t = 1 \ then \ Y1_{mn} \ else \ y_{mnt-1} - x_{mnt-1} + 300 * d_{mnt})$ ,

Ορισμός αρχικών τιμών του υπολοίπου ωρών πτήσης  $y$  για κάθε Α/Φ

- $g_{mnt} = (if \ t = 1 \ then \ G1_{mn} \ else \ g_{mnt-1} - h_{mnt-1} + 320 * f_{mnt})$ ,

Ορισμός αρχικών τιμών του υπολοίπου ωρών συντήρησης  $g$  για τα Α/Φ που βρίσκονται υπό συντήρηση τη χρονική περίοδο  $t = 1$

- $a_{mnt-1} + a_{mnt} \leq y_{mnt-1} - x_{mnt-1} + 1$ , Βοηθητικός λογικός περιορισμός.

Ικανοποιεί τη συνθήκη όταν  $y_{mnt-1} - x_{mnt-1} = 0$  και  $y_{mnt-1} > 0$ , τότε

$a_{mnt} = 0$  (είσοδος Α/Φ στη συντήρηση)

- $a_{mnt-1} + a_{mnt} \geq 1 - (g_{mnt-1} - h_{mnt-1})$ , Βοηθητικός λογικός περιορισμός.

Ικανοποιεί τη συνθήκη όταν  $g_{mnt-1} - h_{mnt-1} = 0$  και  $g_{mnt-1} > 0$ , τότε  $a_{mnt} = 1$

(έξοδος Α/Φ από τη συντήρηση)

## 2.4 Συμπεράσματα

Η υψηλή διαθεσιμότητα του στόλου των αεροσκαφών σε συνδυασμό με την ορθή εκμετάλλευσή τους, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα συμφόρησης στη συντήρησή τους αποτελούν βασικούς στόχους στην Πολεμική Αεροπορία. Μια σωστά κλιμακούμενη πτητική εκμετάλλευση των αεροσκαφών, η οποία θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις του πτητικού έργου της κάθε πτέρυγας, χωρίς να δημιουργεί προβλήματα στον προγραμματισμό της συντήρησής τους, δύναται να συμβάλλει στη μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας του στόλου, που είναι και ο αντικειμενικός στόχος.



Το μοντέλο που αναπτύχθηκε έχει αυτόν ακριβώς το στόχο, τη μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας των αεροσκαφών, αεροσκάφη δηλαδή που τη δεδομένη χρονική περίοδο είναι σε πτητική κατάσταση. Σ' αυτή τη μελέτη ελήφθησαν υπόψη, προσεγγιστικά πάντα, λόγω και του δυναμικού χαρακτήρα του συγκεκριμένου προβλήματος, όλοι εκείνοι οι περιορισμοί που διέπουν τη συντήρηση των αεροσκαφών και επηρεάζουν τον προγραμματισμό της. Στόχος του μοντέλου είναι να αποτελέσει οδηγό όσον αφορά την πτητική εκμετάλλευση των αεροσκαφών μιας πτέρυγας, με σκοπό την αποφυγή προβλημάτων στον σχεδιασμό της συντήρησης και τη μεγιστοποίηση των διαθέσιμων αεροσκαφών για κάθε μοίρα.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΤΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΕΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ**

### **3.1 Γενικά**

Το μοντέλο που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, αποτέλεσε την πρώτη προσπάθεια προσέγγισης του προβλήματος σχεδιασμού πτήσεων και συντηρήσεων αεροσκαφών. Πρόκειται για μια αξιολογη προσπάθεια που ξεκίνησε από μηδενική βάση και έφτασε σε τόσο ικανοποιητικό επίπεδο ώστε να μπορεί να δώσει απαντήσεις σχεδόν σε όλους τους προβληματισμούς που υπήρχαν στην αρχή αλλά και σε αυτούς που προέκυψαν κατά τη διάρκεια ανάπτυξης του. Παρόλα ταύτα, η περαιτέρω μελέτη και ανάλυση του προβλήματος έδειξε ότι υπήρχαν μεγάλα περιθώρια βελτίωσης του συγκεκριμένου μοντέλου. Αφού οι βελτιώσεις αυτές έγιναν, προέκυψε ένα νέο μοντέλο σχεδιασμού πτήσεων και συντηρήσεων αεροσκαφών που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο.

Στο υποκεφάλαιο 3.2 παρουσιάζουμε την πλήρη μαθηματική μορφοποίηση του μοντέλου όπου αυτή περιέχει τις μεταβλητές απόφασης, τις παραμέτρους, την αντικειμενική συνάρτηση καθώς και τους περιορισμούς στους οποίους όλα τα παραπάνω υπόκεινται. Στη συνέχεια και στο υποκεφάλαιο 3.3 αναλύουμε πλήρως τους περιορισμούς του μοντέλου έτσι ώστε να γίνουν σαφείς όλες οι λειτουργίες του και τέλος, στο υποκεφάλαιο 3.4 παραθέτουμε μερικά συμπεράσματα για αυτό.

### 3.2 Μοντέλο Σχεδιασμού Πτήσεων και Συντηρήσεων Α/Φ

Η μαθηματική μορφοποίηση του νέου μοντέλου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η ακόλουθη :

#### **α. Μεταβλητές απόφασης μοντέλου :**

- $Z_1$  : Αντικειμενική συνάρτηση που δηλώνει διαθεσιμότητα,
- $x_{mnt}$  : Ώρες πτήσης του αεροσκάφους  $n$  της μοίρας  $m$  τη περίοδο  $t$ ,
- $y_{mnt}$  : Υπολειπόμενες ώρες πτήσης του αεροσκάφους  $n$  της μοίρας  $m$  στην αρχή της περιόδου  $t$ ,
- $g_{mnt}$  : Υπολειπόμενες εργατώρες συντήρησης του αεροσκάφους  $n$  της μοίρας  $m$  στην αρχή της περιόδου  $t$ ,
- $h_{mnt}$  : Εργατώρες συντήρησης του αεροσκάφους  $n$  της μοίρας  $m$  τη περίοδο  $t$ ,
- $a_{mnt}$  : Δυαδική μεταβλητή απόφασης που παίρνει την τιμή 1 αν το αεροσκάφος  $n$  της μοίρας  $m$  είναι διαθέσιμο τη περίοδο  $t$  και 0 αν δεν είναι διαθέσιμο,
- $d_{mnt}$  : Δυαδική μεταβλητή απόφασης που παίρνει την τιμή 1 αν το αεροσκάφος  $n$  της μοίρας  $m$  εξέρχεται από το σταθμό συντήρησης στην αρχή της περιόδου  $t$  και 0 αν δεν εξέρχεται,
- $f_{mnt}$  : Δυαδική μεταβλητή απόφασης που παίρνει την τιμή 1 αν το αεροσκάφος  $n$  της μοίρας  $m$  εισέρχεται στο σταθμό συντήρησης στην αρχή της περιόδου  $t$

και 0 αν δεν εισέρχεται,

- $q_t$  : Βοηθητική δυαδική μεταβλητή απόφασης,
- $p_{mnt}$  : Βοηθητική δυαδική μεταβλητή απόφασης,
- $r_{mnt}$  : Βοηθητική δυαδική μεταβλητή απόφασης

**β. Παράμετροι μοντέλου :**

- $T$  : Μήκος χρονικού ορίζοντα σε  $t$  περιόδους,
- $A_{mt}$  : Προγραμματισμένες ώρες πτήσεις της μοίρας  $m$  τη περίοδο  $t$ ,
- $B_t$  : Χρονική δυναμικότητα του σταθμού συντήρησης τη περίοδο  $t$ ,
- $Y$  : Υπολειπόμενες ώρες πτήσης ενός αεροσκάφους αμέσως μετά την έξοδο του από το σταθμό συντήρησης,
- $G$  : Υπολειπόμενες εργατώρες συντήρησης ενός αεροσκάφους αμέσως μετά την είσοδό του στο σταθμό συντήρησης,
- $A1_{mn}$  : Κατάσταση του αεροσκάφους  $n$  της μοίρας  $m$  την πρώτη περίοδο του ορίζοντα σχεδιασμού ( $= a_{mn1}$ ),
- $Y1_{mn}$  : Υπολειπόμενες ώρες πτήσης του αεροσκάφους  $n$  της μοίρας  $m$  την πρώτη περίοδο του ορίζοντα σχεδιασμού ( $= y_{mn1}$ ),
- $G1_{mn}$  : Υπολειπόμενες εργατώρες συντήρησης του αεροσκάφους  $n$  της

μοίρας  $m$  την πρώτη περίοδο του ορίζοντα σχεδιασμού ( $= g_{mn1}$ ),

- $D1_{mn}$  : Δυαδική μεταβλητή που καθορίζει αν το αεροσκάφος  $n$  της μοίρας  $m$  εξέρχεται από το σταθμό συντήρησης την πρώτη περίοδο του ορίζοντα σχεδιασμού ( $= d_{mn1}$ ),
- $F1_{mn}$  : Δυαδική μεταβλητή που καθορίζει αν το αεροσκάφος  $n$  της μοίρας  $m$  εισέρχεται στο σταθμό συντήρησης την πρώτη περίοδο του ορίζοντα σχεδιασμού ( $= f_{mn1}$ ),
- $C$  : Ο μέγιστος αριθμός των αεροσκαφών που μπορεί να εξυπηρετηθεί ταυτόχρονα από το σταθμό συντήρησης,
- $J$  : Ελάχιστος μέσος αριθμός υπολειπόμενων ωρών πτήσης ανά αεροσκάφος
- $X_{\max}$  : Μέγιστος αριθμός ωρών πτήσης ενός αεροσκάφους κατά τη διάρκεια μίας περιόδου,
- $Y_{\min}$  : Ελάχιστος αριθμός υπολειπόμενων ωρών πτήσης ενός διαθέσιμου αεροσκάφους,
- $G_{\min}$  : Ελάχιστος υπολειπόμενος αριθμός εργατωρών συντήρησης ενός μη διαθέσιμου αεροσκάφους
- $L, U$  : Πραγματικοί αριθμοί που δηλώνουν την μέγιστη απόκλιση από την  $A_m$
- $BIG$  : Ένας αρκούντως μεγάλος αριθμός
- $V$  : Ο ελάχιστος αριθμός αεροσκαφών που δύναται να πετάξουν ανά μοίρα  $m$  για κάθε περίοδο  $t$

γ. Αντικειμενική συνάρτηση μοντέλου :

$$\text{maximize availability : } \text{Max } z_1 ; \quad (1)$$

δ. Περιορισμοί μοντέλου :

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mnt} \geq z_1, \forall t = 2, \dots, T+1 \quad (2)$$

$$\sum_{n=1}^N a_{mnt} \geq v, \forall m, t = 2, \dots, T+1 \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^N y_{mnt} \geq J^* \sum_{n=1}^N a_{mnt}, \forall m, t = 2, \dots, T+1 \quad (4)$$

$$y_{mnt+1} = y_{mnt} - x_{mnt} + Y^* d_{mnt+1}, \forall m, n, t = 1, \dots, T \quad (5)$$

$$a_{mnt+1} - a_{mnt} - d_{mnt+1} \leq 0, \forall m, n, t = 1, \dots, T \quad (6)$$

$$a_{mnt+1} - a_{mnt} + 1.1(1 - d_{mnt+1}) \geq 0.1, \forall m, n, t = 1, \dots, T \quad (7)$$

$$g_{mnt+1} = g_{mnt} - h_{mnt} + G^* f_{mnt+1}, \forall m, n, t = 1, \dots, T \quad (8)$$

$$a_{mnt} - a_{mnt+1} - f_{mnt+1} \leq 0, \forall m, n, t = 1, \dots, T \quad (9)$$

$$a_{mnt} - a_{mnt+1} + 1.1 * (1 - f_{mnt+1}) \geq 0.1, \forall m, n, t = 1, \dots, T \quad (10)$$

$$L^* A_{mt} \leq \sum_{n=1}^N x_{mnt} \leq U^* A_{mt}, \forall m, t = 1, \dots, T \quad (11)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N h_{mnt} \leq B_t, \forall t = 1, \dots, T \quad (12)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (1 - a_{mnt}) \leq C, \forall t = 2, \dots, T + 1 \quad (13)$$

$$B_t \leq \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N h_{mnt} + BIG * (1 - q_t), \forall t = 1, \dots, T \quad (14)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N g_{mnt} \leq \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N h_{mnt} + BIG * q_t, \forall t = 1, \dots, T \quad (15)$$

$$y_{mnt} \leq Y * a_{mnt}, \forall m, n, t = 2, \dots, T + 1 \quad (16)$$

$$g_{mnt} \leq G * (1 - a_{mnt}), \forall m, n, t = 2, \dots, T + 1 \quad (17)$$

$$x_{mnt} \leq X_{\max} * a_{mnt}, \forall m, n, t = 1, \dots, T \quad (18)$$

$$y_{mnt} \geq Y_{\min} * a_{mnt}, \forall m, n, t = 2, \dots, T + 1 \quad (19)$$

$$g_{mnt} \geq G_{\min} * (1 - a_{mnt}), \forall m, n, t = 2, \dots, T + 1 \quad (20)$$

$$x_{mnt} \leq y_{mnt}, \forall m, n, t = 1, \dots, T \quad (21)$$

$$h_{mnt} \leq g_{mnt}, \forall m, n, t = 1, \dots, T \quad (22)$$

$$a_{mn1} = A1_{mn}, \forall m, n \quad (23)$$

$$y_{mn1} = Y1_{mn}, \forall m, n \quad (24)$$

$$d_{mn1} = D1_{mn}, \forall m, n \quad (25)$$

$$g_{mn1} = G1_{mn}, \forall m, n \quad (26)$$



$$f_{mnt} = F1_{m,n}, \forall m, n \quad (27)$$

$$y_{mnt} + BIG * p_{mnt} \leq BIG, \forall m, n, t = 1, \dots, T \quad (28)$$

$$a_{mnt+1} \leq (y_{mnt} - x_{mnt}) * BIG + BIG * p_{mnt}, \forall m, n, t = 1, \dots, T \quad (29)$$

$$g_{mnt} + BIG * r_{mnt} \leq BIG, \forall m, n, t = 1, \dots, T \quad (30)$$

$$1 - a_{mnt+1} \leq (g_{mnt} - h_{mnt}) * BIG + BIG * r_{mnt}, \forall m, n, t = 1, \dots, T \quad (31)$$

### 3.3 Ανάλυση Περιορισμών Μοντέλου Σχεδιασμού Πτήσεων και Συντηρήσεων Αεροσκαφών

Η αντικειμενική συνάρτηση 1 μεγιστοποιεί τη μεταβλητή  $z_1$ , η οποία, από τον περιορισμό 2, δείχνει τον ελάχιστο αριθμό διαθέσιμων αεροσκαφών της πτέρυγας σε οποιαδήποτε περίοδο. Η διαθεσιμότητα της πρώτης περιόδου καθορίζεται, επομένως δεν εμπεριέχεται στην αντικειμενική συνάρτηση. Προκειμένου να αποτελέσει μια ομαλή εφαρμογή του μοντέλου για τον επόμενο ορίζοντα, η έκφραση για την  $z_1$  επεκτείνεται επίσης στην πρώτη περίοδο εκείνου του ορίζοντα. Το ίδιο ισχύει για διάφορους άλλους περιορισμούς του μοντέλου.

Ο περιορισμός 3 επιβάλλει ένα κατώτατο όριο στον αριθμό διαθέσιμων αεροσκαφών για κάθε μοίρα σε οποιαδήποτε περίοδο. Ο περιορισμός 4 επιβάλλει ένα κατώτατο όριο στο μέσο υπολειπόμενο χρόνο πτήσης κάθε διαθέσιμου αεροσκάφους. Πιο συγκεκριμένα, εξασφαλίζει ότι κάθε διαθέσιμο αεροσκάφος θα έχει έναν υπολειπόμενο χρόνο πτήσης που είναι τουλάχιστον ίσος με το  $J$  κατά μέσο όρο. Με

αυτό το τρόπο, λύσεις με έναν μεγάλο αριθμό διαθέσιμων αεροσκαφών κάθε ένα από τα οποία έχει ένα μικρό υπολειπόμενο χρόνο πτήσης αποκλείονται.

Ο περιορισμός 5 χρησιμοποιείται για να ανανεώσει τον υπολειπόμενο χρόνο πτήσης κάθε αεροσκάφους στο τέλος κάθε περιόδου, με βάση τον υπολειπόμενο χρόνο πτήσης του στην αρχή αυτής της περιόδου και το χρόνο που πέταξε κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Η δυαδική μεταβλητή  $d$  παίρνει την τιμή 1 μόνο όταν το αντίστοιχο αεροσκάφος εξέρχεται από το σταθμό της συντήρησης. Με αυτό το τρόπο, ένα αεροσκάφος που εξέρχεται από το σταθμό συντήρησης είναι διαθέσιμο να πετάξει ξανά με το μέγιστο υπολειπόμενο χρόνο πτήσης,  $Y$ . Ομοίως, ο περιορισμός 8 χρησιμοποιείται για να ανανεώσει τον υπολειπόμενο χρόνο συντήρησης κάθε αεροσκάφους στο τέλος κάθε περιόδου, με βάση τον υπολειπόμενο χρόνο συντήρησής του στην αρχή αυτής της περιόδου και το χρόνο που συντηρήθηκε κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Η δυαδική μεταβλητή  $f$  παίρνει την τιμή 1 μόνο όταν το αντίστοιχο αεροσκάφος εισέρχεται στο σταθμό συντήρησης για να συντηρηθεί. Με αυτό το τρόπο, ένα αεροσκάφος που εισέρχεται στο σταθμό συντήρησης είναι έτοιμο για να δεχθεί τη συντήρηση για το μέγιστο υπολειπόμενο χρόνο συντήρησης,  $G$ .

Οι περιορισμοί 6, 7, 9 και 10 εξασφαλίζουν ότι οι μεταβλητές  $d$  και  $f$  θα πάρουν τις σωστές τιμές, με βάση τις τιμές των μεταβλητών  $a$ . Έστω το  $n^{th}$  αεροσκάφος της  $m^{th}$  μοίρας. Οι μεταβλητές  $(a_{mnt}, a_{mnt+1})$  μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε από τις τιμές (0,1), (0,0), (1,0) και (1,1) και η διαφορά  $a_{mnt+1} - a_{mnt}$  είναι ίση με 1, 0, -1 και 0, αντίστοιχα. Η μεταβλητή  $d_{mnt+1}$  πρέπει να πάρει την τιμή 1

όταν  $(a_{mnt}, a_{mnt+1}) = (0, 1)$  και αυτό εξασφαλίζεται από τον περιορισμό 6. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, η  $d_{mnt+1}$  πρέπει να είναι 0 και αυτό εξασφαλίζεται από το περιορισμό 7. Ομοίως, η μεταβλητή  $f_{mnt+1}$  πρέπει να πάρει την τιμή 1 όταν  $(a_{mnt}, a_{mnt+1}) = (1, 0)$  και αυτό εξασφαλίζεται από το περιορισμό 9. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, η  $f_{mnt+1}$  πρέπει να είναι 0 και αυτό εξασφαλίζεται από το περιορισμό 10.

Ο περιορισμός 11 εξασφαλίζει ότι το πρόγραμμα για κάθε μοίρα ικανοποιείται. Οι μεταβλητές  $L$  και  $U$  καθορίζουν ένα διάστημα  $[LA_{mt}, UA_{mt}]$ , στο οποίο ο πραγματικός χρόνος πτήσης μοιρών για τη συνδεδεμένη περίοδο πρέπει να ανήκει. Παραδείγματος χάριν, όταν  $L = 0.95$  και  $U = 1.05$ , μια μέγιστη απόκλιση 5% από το πρόγραμμα επιτρέπεται. Οι περιορισμοί 12 και 13 εξασφαλίζουν ότι οι περιορισμοί για τη χρονική και χωρική δυναμικότητα του σταθμού συντήρησης δεν παραβιάζονται, σε οποιαδήποτε περίοδο. Οι περιορισμοί 14 και 15 εισάγονται για να εξασφαλίσουν ότι η συντήρηση δεν θα είναι άεργη όποτε υπάρχει τουλάχιστον ένα αεροσκάφος που περιμένει να συντηρηθεί. Με την εισαγωγή της βοηθητικής δυαδικής μεταβλητής  $q_t$ , εξασφαλίζεται ότι ο συνολικός χρόνος συντήρησης που παρέχεται από το σταθμό στην περίοδο  $t$  θα είναι ίσος είτε με τη συνολική χρονική δυναμικότητα του σταθμού κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου είτε με τις συνολικές απαιτήσεις συντήρησης αυτής της περιόδου, οποιαδήποτε από αυτές τις δύο ποσότητες είναι μικρότερη.

Ο περιορισμός 16 δηλώνει ότι ο υπολειπόμενος χρόνος πτήσης ενός αεροσκάφους δεν μπορεί να υπερβεί τη μέγιστη τιμή,  $Y$ , και εξασφαλίζει ότι θα είναι

0 όποτε αυτό το αεροσκάφος δεν είναι διαθέσιμο. Ομοίως, ο περιορισμός 17 δηλώνει ότι ο υπολειπόμενος χρόνος συντήρησης ενός αεροσκάφους δεν μπορεί να υπερβεί τη μέγιστη τιμή,  $G$ , και εξασφαλίζει ότι θα είναι 0 όποτε αυτό το αεροσκάφος είναι διαθέσιμο. Ο περιορισμός 18 επιβάλλει ένα ανώτερο όριο στο μέγιστο χρόνο που ένα αεροσκάφος μπορεί να πετάξει κατά τη διάρκεια ενός και μόνο ενός χρονικού διαστήματος. Ένας τέτοιος περιορισμός μπορεί να είναι απαραίτητος για τεχνικούς λόγους. Οι περιορισμοί 19 και 20 επιβάλλουν κατώτερες τιμές στους υπολειπόμενους χρόνους πτήσης και συντήρησης κάθε αεροσκάφους. Εισάγονται για να εξαλείψουν την περίπτωση όπου ένα αεροσκάφος έχει ένα αμελητέο υπολειπόμενο χρόνο πτήσης ή συντήρησης. Ο περιορισμός 21 εξασφαλίζει ότι ο συνολικός χρόνος που ένα αεροσκάφος πετά κατά τη διάρκεια μιας και μόνο μιας περιόδου δεν υπερβαίνει τον υπολειπόμενο χρόνο πτήσης αυτού του αεροσκάφους στην αρχή της ίδιας περιόδου. Ομοίως, ο περιορισμός 22 εξασφαλίζει ότι ο συνολικός χρόνος που το πλήρωμα της συντήρησης εργάζεται σε ένα αεροσκάφος κατά τη διάρκεια μιας περιόδου δεν υπερβαίνει τον υπολειπόμενο χρόνο συντήρησης αυτού του αεροσκάφους στην αρχή της ίδιας περιόδου.

Οι περιορισμοί 23, 24, 25, 26 και 27 χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν την κατάσταση του συστήματος τη πρώτη περίοδο του ορίζοντα σχεδιασμού. Οι περιορισμοί 28 και 29 εισάγονται για να εξασφαλίσουν ότι η διαθεσιμότητα του αεροσκάφους τερματίζει όταν μειώνεται ο υπολειπόμενος χρόνος πτήσης του σε 0. Εάν  $y_{mnl} > 0$ , η βοηθητική μεταβλητή απόφασης  $p_{mnl}$  στον περιορισμό 28 είναι ίση με 0. Σε εκείνη την περίπτωση, ο περιορισμός 29 υποχρεώνει την μεταβλητή  $a_{mnl+1}$  να πάρει την τιμή 0 εάν  $y_{mnl} = x_{mnl}$ , αφού ο υπολειπόμενος χρόνος πτήσης αυτού

του αεροσκάφους μειώνεται σε 0 κατά τη διάρκεια της περιόδου  $t$ . Ομοίως, οι περιορισμοί 30 και 31 εξασφαλίζουν ότι ένα αεροσκάφος γίνεται διαθέσιμο όταν ο υπολειπόμενος χρόνος συντήρησής του μειώνεται σε 0. Εάν  $g_{mnt} > 0$ , η βοηθητική μεταβλητή απόφασης  $r_{mnt}$  στον περιορισμό 30 είναι ίση με 0. Σε εκείνη την περίπτωση, ο περιορισμός 31 ωθεί την  $a_{mnt+1}$  στην τιμή 1 εάν  $g_{mnt} = h_{mnt}$ , αφού ο υπολειπόμενος χρόνος συντήρησης αυτού του αεροσκάφους μειώνεται σε 0 κατά τη διάρκεια της περιόδου  $t$ .

Το μοντέλο είναι ακριβές, δεδομένου ότι ενσωματώνει όλες τις πτυχές του προβλήματος, όπως τη χωρική και χρονική δυναμικότητα του σταθμού συντήρησης, τις απαιτήσεις πτήσης, τις ανάγκες συντήρησης, κ.λπ.... Ο μεγάλος αριθμός μεταβλητών απόφασης ενισχύει την ευελιξία του και κάνει την εισαγωγή των πρόσθετων περιορισμών απλή.

Η αντικειμενική συνάρτηση μεγιστοποιεί τη συνολική διαθεσιμότητα, εκφρασμένη σε αριθμό διαθέσιμων αεροσκαφών σε κάθε περίοδο. Ένας ελάχιστος αριθμός διαθέσιμων αεροσκαφών για κάθε μοίρα σε κάθε περίοδο εξασφαλίζεται από το περιορισμό 3. Εναλλακτικά, κάποιος μπορεί να μεγιστοποιήσει τη διαθεσιμότητα σε κάθε μοίρα και να επιβάλει ένα κατώτερο όριο στο συνολικό αριθμό διαθέσιμων αεροσκαφών. Αυτό εξαρτάται από το εάν η ετοιμότητα της πτέρυγας ή η ετοιμότητα κάθε μοίρας χωριστά είναι κρίσιμότερη. Γενικά, η ετοιμότητα ολόκληρης της πτέρυγας είναι κρίσιμότερη, μιας και καμία διάκριση μεταξύ των μοιρών δε γίνεται σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

Ο περιορισμός 4 εξασφαλίζει έναν ελάχιστο μέσο υπολειπόμενο χρόνο πτήσης για κάθε διαθέσιμο αεροσκάφος, και μαζί με τον περιορισμό 3 εξασφαλίζουν μια

ελάχιστη υπολειπόμενη χρονική διαθεσιμότητα πτήσης και για τη πτέρυγα και για κάθε μεμονωμένη μοίρα χωριστά. Με αυτό το τρόπο, η δεύτερη έκφραση για τη διαθεσιμότητα ενσωματώνεται στο μοντέλο. Το μοντέλο υποθέτει ότι αλλαγές στη κατάσταση των αεροσκαφών επιτρέπονται μόνο στην αρχή κάθε χρονικής περιόδου.

Η δεξιά ανισότητα του περιορισμού 11 είναι στις περισσότερες περιπτώσεις περιττή, μιας και η μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης επιτυγχάνεται όταν τα αεροσκάφη πετούν το λιγότερο δυνατό χρόνο.

### 3.4 Συμπεράσματα

Έστερα από την παρουσίαση και την ανάλυση του μοντέλου το πρώτο συμπέρασμα που βγάζουμε είναι ότι υπάρχει σημαντική διαφορά ανάμεσα σε αυτό και στο αρχικό που παρατέθηκε στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Οι πρώτες διαφορές γίνονται εύκολα αντιληπτές μόνο και μόνο από μια απλή ανάγνωση των δύο μοντέλων. Αυτές σαν σχέση του νέου μοντέλου ως προς το αρχικό είναι ο σαφώς μεγαλύτερος όγκος του πρώτου, οι αρκετές νέες μεταβλητές απόφασης που εισήχθησαν καθώς και οι καινούριοι παράμετροι.

Όσον αφορά τις διαφορές στη λειτουργία των δύο μοντέλων αυτές θα φανούν σε επόμενα κεφάλαια. Ως προς το θέμα των σημαντικών βελτιώσεων που πραγματοποιήθηκαν αυτές παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια όπου και θα δούμε μερικές από τις διεργασίες που γίνονται κατά την εφαρμογή του μοντέλου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΑΡΧΙΚΟ ΣΤΟ ΝΕΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

### 4.1 Γενικά

Οι πρώτες αφορμές για τις βελτιώσεις που κάναμε στο αρχικό μοντέλο προέκυψαν ύστερα από την προσεκτική μελέτη του μοντέλου μας καθώς επίσης και από την ανάγνωση των αποτελεσμάτων κάποιων εφαρμογών που επιλύθηκαν με τη χρήση αυτού. Η παραπάνω διαδικασία μας έδειξε σε ποιον ακριβώς δρόμο θα έπρεπε να κινηθούμε. Η διαδικασία της βελτιστοποίησης ήταν αρκετά δύσκολη γιατί παρά το ότι το αρχικό μοντέλο έδινε ικανοποιητικά αποτελέσματα υπήρχαν πολλά περιθώρια βελτίωσης. Οι βελτιώσεις που έγιναν στο αρχικό μοντέλο αφορούσαν όλο το εύρος του, δηλαδή, βελτιώθηκαν κάποιοι περιορισμοί , προστέθηκαν και αναιρέθηκαν κάποιοι άλλοι καθώς και κάποιες καινούριες μεταβλητές και παράμετροι. Ουσιαστικά αυτό που προέκυψε είναι ένα καινούριο μοντέλο, σαφώς βελτιωμένο, που παρά τις πολλές αλλαγές έχει τη βάση του στο αρχικό.

Όσον αφορά τη δομή αυτού του κεφαλαίου στο υποκεφάλαιο 4.2 απλά αναφέρουμε ότι παραθέτουμε σε αυτό **ενδεικτικά** κάποιες από τις σημαντικότερες διαδικασίες βελτίωσης που κάναμε καθώς και στο υποκεφάλαιο 4.3 κάποια σχόλια που έχουν να κάνουν με την τελική του μορφή.

### 4.2 Διαδικασίες Βελτίωσης

#### 4.2.1 1<sup>η</sup> Διαδικασία

Ένα από τα αρχικά προβλήματα που εντοπίσαμε ήταν η αδυναμία της



συντήρησης να ανταποκριθεί πλήρως στο έργο της. Πιο συγκεκριμένα, είδαμε ότι το εργατικό δυναμικό της συντήρησης δεν εργαζόταν στο μέγιστο των δυνατοτήτων του με αποτέλεσμα αεροσκάφη που θα έπρεπε να έχουν ολοκληρώσει τη συντήρηση και να είναι πτήσιμα να παραμένουν στο υπόστεγο της συντήρησης. Οι περιορισμοί που κάλυπταν αυτή τη διαδικασία στο αρχικό μοντέλο ήταν οι εξής :

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N h_{mnt} \leq B_t, \forall t,$$

Ο περιορισμός αυτός μας δείχνει ότι ο συνολικός αριθμός εργατωρών που εργάστηκε η συντήρηση για όλα τα αεροσκάφη όλων των μοιρών ανά περίοδο είναι μικρότερος ή ίσος από την συνολική δυνατότητα παροχής εργατωρών συντήρησης (για όλες τις μοίρες) ανά περίοδο. Το πρόβλημα με το συγκεκριμένο περιορισμό είναι ότι δεν αναγκάζει τη συντήρηση να εξαντλήσει τις δυνατότητες της απλά της απαγορεύει να υπερβεί το μέγιστο αριθμό εργατωρών, κάτι που είναι λογικό.

Αυτό που κάναμε εμείς έτσι ώστε να ξεπεράσουμε το συγκεκριμένο πρόβλημα ήταν το **να προσθέσουμε δύο ακόμη περιορισμούς** που σε συνδυασμό με τον παλιό να μας εξασφαλίσουν την εξάντληση των εργατωρών που έχει στη διάθεση της η συντήρηση, σε περίπτωση που αυτό απαιτείται. Οι δύο αυτοί περιορισμοί είναι οι εξής :

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N g_{mnt} \leq \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N h_{mnt} + BIG * q_t$$

$$B_t \leq \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N h_{mnt} + BIG * (1 - q_t)$$

Με την προσθήκη των δύο αυτών περιορισμών το πρόβλημα που αντιμετωπίζαμε λύνεται πλήρως. Βλέπουμε ότι μαζί με την εισαγωγή των δύο αυτών περιορισμών εισαγάγαμε και μια μεταβλητή την  $q_t$  η οποία είναι δυαδική μεταβλητή

που παίρνει την τιμή 1 όταν ισχύει  $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N g_{mnt} > B_t$ , αλλιώς παίρνει την τιμή 0. Η

λειτουργία των δύο παραπάνω περιορισμών είναι η εξής :

- Όταν το  $q$  είναι 1 ο δεύτερος περιορισμός γίνεται  $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N h_{mnt} \geq B_t$  και σε

συνδυασμό με τον παλιό περιορισμό δηλαδή τον  $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N h_{mnt} \leq B_t$  έχουμε

$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N h_{mnt} = B_t$  που σημαίνει ότι η συντήρηση θα δουλέψει στο μέγιστο των

δυνατοτήτων της δηλαδή θα εξαντλήσει όλες τις ώρες που θα έχει στη διάθεση της.

Όσο για τον πρώτο περιορισμό, όταν το  $q$  είναι 1, αυτός απλά επαληθεύεται.

- Όταν το  $q$  είναι 0 ισχύει ότι  $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N g_{mnt} < B_t$ , δηλαδή οι ώρες που

απομένουν στα Α/Φ για συντήρηση είναι λιγότερες από τις ώρες που παρέχεται δυνατότητα συντήρησης. Ο πρώτος περιορισμός, όταν  $q = 0$ , γίνεται

$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N g_{mnt} \leq \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N h_{mnt}$  που μπορεί να ισχύει μόνο στην περίπτωση που είναι

$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N g_{mnt} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N h_{mnt}$ . Δηλαδή αναγκάζει τη συντήρηση να δουλέψει όσο

ακριβώς χρειάζεται έτσι ώστε να συντηρηθούν τα  $A/\Phi$  και να εξέλθουν από τη συντήρηση. Όσο για το δεύτερο περιορισμό, όταν το  $q$  είναι 0, αυτός απλά επαληθεύεται.

#### 4.2.2 2<sup>η</sup> Διαδικασία

Ύστερα από τη διόρθωση του βασικού προβλήματος που είχε παρατηρηθεί εξ' αρχής ξεκίνησε η διερεύνηση όλου του μοντέλου προκειμένου να προκύψουν οι μετέπειτα βελτιώσεις που θα κάναμε. Το επόμενο ζήτημα που αντιμετωπίσαμε ήταν το πρόβλημα της αντικειμενικής συνάρτησης. Έτσι όπως είχε στηθεί το αρχικό μοντέλο προέκυπτε ένα πρόβλημα στον προσδιορισμό των  $d_{t+1}$ ,  $f_{t+1}$  από τα  $a_t$  και  $a_{t+1}$ . Οι τιμές των δύο πρώτων μεταβλητών προκύπτουν από τις τιμές των δύο επόμενων. Στον παρακάτω πίνακα,

$a_t$	$a_{t+1}$	$d_{t+1}$	$f_{t+1}$
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	0 ή 1	0 ή 1

βλέπουμε ότι προκύπτουν σαφείς τιμές για τα  $d$ ,  $f$  για τις τρεις πρώτες περιπτώσεις ενώ για την τελευταία ταλαντεύονται μεταξύ των τιμών 0 και 1. Αυτές οι τιμές προκύπτουν από τους περιορισμούς  $d_{mnl+1} \geq a_{mnl+1} - a_{mnl}$  και  $d_{mnl} \leq a_{mnl}$  για τον ορισμό του  $d$  καθώς και  $f_{mnl+1} \geq a_{mnl} - a_{mnl+1}$  και  $f_{mnl+1} \leq a_{mnl}$  για τον ορισμό του  $f$ . Οι παραπάνω περιορισμοί αδυνατούν να ορίσουν τιμές για την τέταρτη

περίπτωση. Αυτό ήρθε η αντικειμενική συνάρτηση να το διορθώσει η οποία είναι η

$$z - \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N BIG^*(d_{nmt} + f_{nmt}), \forall n, m, t. \text{ Αυτό που κάνει είναι να δίνει τις}$$

τιμές 0 στην τέταρτη περίπτωση.

Στο καινούριο μοντέλο εξασφαλίζονται οι τιμές όλων των περιπτώσεων από τους περιορισμούς [6],[7] για το  $d$  και από τους περιορισμούς [9],[10] για το  $f$  δίνοντας μας το δικαίωμα να απαλείψουμε ταυτόχρονα το δεύτερο μέλος της αντικειμενικής συνάρτησης και τελικά να έχουμε αυτή στη μορφή της [1].

#### 4.3.3 3<sup>η</sup> Διαδικασία

Στα προηγούμενα δύο υποκεφάλαια παρουσιάσαμε ενδεικτικά δύο από τις πιο σημαντικές διαδικασίες βελτίωσης. Εδώ θεωρούμε σημαντικό να αναφέρουμε τις καινούριες μεταβλητές που εισήχθησαν στο μοντέλο καθώς και να συσχετίσουμε τις ήδη υπάρχουσες μεταβλητές και παραμέτρους μεταξύ των δύο μοντέλων γιατί κάποιοι από αυτούς άλλαξαν συμβολισμούς.

Οι καινούριες μεταβλητές που εισήχθησαν είναι οι  $q_t$ ,  $p_{mnt}$ ,  $r_{mnt}$  των οποίων η χρησιμότητα έγκειται στο ότι είναι βοηθητικές μεταβλητές που σκοπό έχουν την υποβοήθηση της ορθής λειτουργίας κάποιων περιορισμών.

Επιπλέον, υπάρχουν και κάποιοι νέοι παράμετροι που εισήχθησαν και είναι οι  $Al_{mn}$ ,  $Dl_{mn}$ ,  $F1_{mn}$ ,  $X_{\max}$ ,  $Y_{\min}$ ,  $G_{\min}$ ,  $L$ ,  $U$  και  $v$ . Η χρησιμότητα αυτών των παραμέτρων έχει διατυπωθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Λόγω του γεγονότος ότι αλλάξαμε κάποιους συμβολισμούς και του ότι προσθέσαμε και κάποιους δείκτες στις μεταβλητές και στις παραμέτρους μας πρέπει σε αυτό το σημείο να κάνουμε μια συσχέτιση μεταξύ αυτών από το αρχικό στο νέο μοντέλο.

ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ
$x \rightarrow x_{mnt}$	$A \rightarrow A_{mt}$
$y \rightarrow y_{mnt}$	$B \rightarrow B_t$
$g \rightarrow g_{mnt}$	$G_o \rightarrow G$
$h \rightarrow h_{mnt}$	$Y_o \rightarrow Y$
$a \rightarrow a_{mnt}$	$C_o \rightarrow C$
$d \rightarrow d_{mnt}$	$Y1 \rightarrow Y1_{mn}$
$f \rightarrow f_{mnt}$	$G1 \rightarrow G1_{mn}$
	$J_o \rightarrow J$
	$X_o \rightarrow X_{\max}$

#### 4.2.4 4<sup>η</sup> Διαδικασία

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι εκτός από αυτές τις αλλαγές έχουμε και άλλες στις μεταβλητές και στις παραμέτρους του προβλήματος. Σε μερικές από αυτές αυξήσαμε το εύρος των περιόδων για τις οποίες αυτές ορίζονται, κατά μία περίοδο. Αυτό βέβαια δεν έγινε τυχαία. Στόχος αυτής της αλλαγής ήταν να μας δώσει κάποιες τιμές έξω από τον ορίζοντα σχεδιασμού  $T$ . Αυτή είναι μία από τις βασικές διαφοροποιήσεις των δύο μοντέλων μιας και προσθέτει στο μοντέλο μας ένα χαρακτήρα ‘συνέχειας’. Με τον όρο ‘συνέχεια’ εννοούμε ότι μας δίνεται η δυνατότητα να συνεχίσουμε τον σχεδιασμό των πτήσεων και των συντηρήσεων για τον επόμενο ορίζοντα σχεδιασμού. Αυτό γίνεται τροφοδοτώντας το πρόβλημα, για την πρώτη περίοδο του επόμενου ορίζοντα σχεδιασμού, με τα δεδομένα των μεταβλητών και των παραμέτρων της περιόδου  $t+1$  ( $7^{ης}$ ) που προέκυψαν από τη λύση του προβλήματος για τον προηγούμενο ορίζοντα σχεδιασμού. Την πλήρη εφαρμογή αυτής της δυνατότητας που μας δίνει το μοντέλο μας θα την δούμε σε επόμενο κεφάλαιο.

#### 4.3 Συμπεράσματα

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να μας εισάγει στη λογική των βελτιώσεων που έγιναν καθώς και να παρουσιάσει μερικές από τις σημαντικότερες από αυτές. Αποφύγαμε να παρουσιάσουμε το σύνολο των βελτιώσεων λόγω του ότι αρκετές από αυτές είναι ευδιάκριτες και πλήρως κατανοητές από την ανάλυση που έγινε στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε, ότι η μεγάλη βελτίωση του αρχικού που τελικά μας έδωσε το νέο μοντέλο δεν απαξιώνει και δεν υποβαθμίζει καθόλου την αρχική

προσπάθεια. Το επίπεδο αυτής ήταν εξαιρετικό, δεδομένου ότι επρόκειτο για μια πρώτη προσέγγιση στο πρόβλημα.

Τα αποτελέσματα του συνόλου των βελτιώσεων και η πρόοδος που έχει σημειωθεί θα φανούν στο επόμενο κεφάλαιο όπου θα παρουσιασθεί η εφαρμογή του μοντέλου σε ένα πραγματικό πρόβλημα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

### 5.1 Γενικά

Οι παρατηρήσεις που αφορούν την αναλυτική περιγραφή του μοντέλου που αναπτύξαμε, έχουν να κάνουν με :

- Τη δυνατότητα επιλογής του αριθμού των μοιρών στο μοντέλο καθώς και του αριθμού των Α/Φ τους.
- Τη δυνατότητα επιλογής του αριθμού των Α/Φ που έχει τη δυνατότητα να υποδέχεται το υπόστεγο συντήρησης
- Τη δυνατότητα να εισάγουμε τον αριθμό εργατωρών που δύναται να παρέχει η συντήρηση ανά χρονική περίοδο  $t$
- Τη δυνατότητα να εισάγουμε τον αρχικό υπολειπόμενο για συντήρηση αριθμό ωρών πτήσεων ανά Α/Φ.

Θα ακολουθήσει στο υποκεφάλαιο 4.2 η αναλυτική περιγραφή του μοντέλου, όπως αυτή διατυπώνεται στην AMPL (A Modeling Language for Mathematical Programming) που είναι ένα λογισμικό επίλυσης προβλημάτων γραμμικού και ακέραιου προγραμματισμού. Στη συνέχεια στο υποκεφάλαιο 4.3 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου σχεδιασμού πτήσεων και συντηρήσεων Α/Φ καθώς και τα αποτελέσματα αυτής της εφαρμογής. Τέλος στο υποκεφάλαιο 4.4 θα χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα της παραπάνω εφαρμογής ως δεδομένα έτσι ώστε να εφαρμοστούν ξανά στην ίδια εφαρμογή προκειμένου να διαπιστώσουμε τη καλή ροή των αποτελεσμάτων που μας δίνει το μοντέλο καθώς και την ικανότητα του, με



αυτόν τον τρόπο, να καταστρώνει μακροπρόθεσμους σχεδιασμούς πτήσεων και συντηρήσεων.

## 5.2 Εφαρμογή Μοντέλου Σχεδιασμού Πτήσης και Συντήρησης Αεροσκαφών με Χρήση της AMPL

Για την εφαρμογή του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα μαθηματικού προγραμματισμού AMPL. Η αναλυτική περιγραφή του μοντέλου, όπως αυτή διατυπώνεται στην AMPL ( A Modeling Language for Mathematical Programming ), είναι η ακόλουθη :

### **# Sets**

Set M; #Αριθμός μοιρών

Set N; # Αριθμός αεροσκαφών

### **# Παράμετροι**

param T; # Χρονικός ορίζοντας

param A {M,1..T}; # Προγραμματισμένες ώρες πτήσης την περίοδο T

param B {1..T}; # Δυνατότητα παροχής συντήρησης

param Y ; # Μέγιστος αριθμός υπολειπόμενων ωρών πτήσης (μετά την έξοδο του Α/Φ από την συντήρηση ) για κάθε περίοδο T

param G ; # Μέγιστος αριθμός υπολειπόμενων εργασιών συντήρησης ( μετά την είσοδο του Α/Φ στη συντήρηση ) για κάθε περίοδο T

param A1 {M,N}; # Αρχικές τιμές του  $a$  για κάθε  $A/\Phi$  την χρονική περίοδο  $t=1$

param Y1 {M,N}; # Αρχικές τιμές του  $y$  για κάθε  $A/\Phi$  την χρονική περίοδο  $t=1$

param G1 {M,N}; # Αρχικές τιμές του  $g$  για κάθε  $A/\Phi$  την χρονική περίοδο  $t=1$

param D1 {M,N}; # Δυαδική μεταβλητή που καθορίζει αν τα  $A/\Phi$  εξέρχονται από τη συντήρηση την πρώτη περίοδο του ορίζοντα σχεδιασμού

param F1 {M,N}; # Δυαδική μεταβλητή που καθορίζει αν τα  $A/\Phi$  εισέρχονται στη συντήρηση την πρώτη περίοδο του ορίζοντα σχεδιασμού

param C; # Αριθμός σταθμών συντήρησης

param J; # Ελάχιστος μέσος αριθμός υπολειπόμενων ωρών πτήσης ανά μοίρα και ανά  $A/\Phi$  μέχρι την είσοδο στη συντήρηση

param Xmax; # Μέγιστος αριθμός ωρών πτήσης ανά  $A/\Phi$  κατά τη διάρκεια μίας περιόδου εφόσον αυτό δύναται να πετάξει

param Ymin; # Ελάχιστος αριθμός υπολειπόμενων ωρών πτήσης ανά  $A/\Phi$  κατά τη διάρκεια μίας περιόδου εφόσον αυτό δύναται να πετάξει

param Gmin; # Ελάχιστος υπολειπόμενος αριθμός εργατωρών συντήρησης ανά  $A/\Phi$  όταν αυτό βρίσκεται στη συντήρηση

param L; # Πραγματικός αριθμός που δηλώνει την κάτω απόκλιση από την τιμή  $A_{mt}$

param U; # Πραγματικός αριθμός που δηλώνει την άνω απόκλιση από την τιμή  $A_{mt}$

param BIG; # Ένας αρκούντως μεγάλος αριθμός

param V; # Ελάχιστος αριθμός  $A/\Phi$  που δύναται να πετάξουν ανά μοίρα για κάθε περίοδο  $T$

### # Μεταβλητές Απόφασης

var  $z_1$ ;                      # Αντικειμενική συνάρτηση

var  $x \{M, N, 1..T\} \geq 0$ ;      # Ώρες πτήσης ανά Α/Φ για κάθε περίοδο T

var  $y \{M, N, 1..T+1\} \geq 0$ ;      # Υπολειπόμενες ώρες πτήσης ανά Α/Φ για κάθε περίοδο T

var  $g \{M, N, 1..T+1\} \geq 0$ ;      # Υπολειπόμενες ώρες συντήρησης ανά Α/Φ για κάθε περίοδο T

var  $h \{M, N, 1..T\} \geq 0$ ;      # Ώρες συντήρησης ανά Α/Φ για κάθε περίοδο T

var  $a \{M, N, 1..T+1\}$  binary;      # Διαθεσιμότητα Α/Φ 1 – 0( πτήσιμο ή όχι ) για κάθε περίοδο T

var  $d \{M, N, 1..T+1\}$  binary;      # Βοηθητική μεταβλητή(προσθέτει 300 ώρες πτήσης)

var  $f \{M, N, 1..T+1\}$  binary;      # Βοηθητική μεταβλητή(προσθέτει 320 ώρες συντήρησης)

var  $q \{1..T\}$  binary;      # Βοηθητική μεταβλητή

var  $p \{M, N, 1..T\}$  binary;      # Βοηθητική μεταβλητή

var  $r \{M, N, 1..T\}$  binary;      # Βοηθητική μεταβλητή

### #Αντικειμενική συνάρτηση

maximize availability:  $z_1$ ;

### #Περιορισμοί

subject to avail {t in 2..T+1}:

sum {m in M,n in N} a[m,n,t] >= z<sub>1</sub>; # Συνολικός ελάχιστος αριθμός Α/Φ

subject to a\_avail {m in M,t in 2..T+1}:

sum {n in N} a[m,n,t] >= V; # Ελάχιστος αριθμός διαθέσιμων Α/Φ ανά μοίρα

subject to avg\_y {m in M, t in 2..T+1}:

sum {n in N} y[m,n,t] >= J\*sum {n in N} a[m,n,t] ; # Ελάχιστος μέσος αριθμός υπολειπόμενων ωρών πτήσης

subject to flight\_hrs {m in M, n in N, t in 1..T}:

y[m,n,t+1] = y[m,n,t] - x[m,n,t] + Y\*d[m,n,t+1]; # Υπολειπόμενες ώρες πτήσης

subject to d\_constr1 {m in M, n in N, t in 1..T}:

a[m,n,t+1] - a[m,n,t] - d[m,n,t+1] <= 0;

subject to d\_constr2 {m in M, n in N, t in 1..T}:

a[m,n,t+1] - a[m,n,t] + 1.1\*(1-d[m,n,t+1]) >= 0.1;

subject to maint\_hrs {m in M, n in N, t in 1..T}:

g[m,n,t+1] = g[m,n,t] - h[m,n,t] + G\*f[m,n,t+1]; # Υπολειπόμενες εργατώρες συντήρησης

subject to f\_constr1 {m in M, n in N, t in 1..T}:

a[m,n,t] - a[m,n,t+1] - f[m,n,t+1] <= 0;

subject to f\_constr2 {m in M, n in N, t in 1..T}:

$a[m,n,t] - a[m,n,t+1] + 1.1*(1-f[m,n,t+1]) \geq 0.1;$

subject to progr\_hrs {m in M, t in 1..T}:

$L*A[m,t] \leq \sum \{n \in N\} x[m,n,t] \leq U*A[m,t];$  # Περιορισμός προγραμματισμού  
ωρών πτήσεων

subject to maint\_capacity {t in 1..T}:

$\sum \{m \in M, n \in N\} h[m,n,t] \leq B[t];$  # Δυνατότητα παροχής εργασιών  
συντήρησης

subject to constr\_g\_h {t in 1..T}:

$\sum \{m \in M, n \in N\} g[m,n,t] \leq \sum \{m \in M, n \in N\} h[m,n,t] + BIG*q[t];$

subject to constr\_h {t in 1..T}:

$B[t] \leq \sum \{m \in M, n \in N\} h[m,n,t] + BIG*(1-q[t]);$

subject to numb\_maint {t in 2..T+1}:

$\sum \{m \in M, n \in N\} (1-a[m,n,t]) \leq C;$  # Χωρητικότητα σταθμού συντήρησης

subject to check\_fl\_hrs {m in M, n in N, t in 2..T+1}:

$y[m,n,t] \leq Y*a[m,n,t];$

subject to check\_maint\_hrs {m in M, n in N, t in 2..T+1}:

$g[m,n,t] \leq G*(1-a[m,n,t]);$

subject to upper\_x {m in M, n in N, t in 1..T}:

$x[m,n,t] \leq X_{\max} * a[m,n,t];$  # Μέγιστος αριθμός ωρών πτήσης

subject to lower\_y {m in M, n in N, t in 2..T+1}:

$y[m,n,t] \geq Y_{\min} * a[m,n,t];$  # Ελάχιστος αριθμός υπολειπόμενων ωρών πτήσης

subject to lower\_g {m in M, n in N, t in 2..T+1}:

$g[m,n,t] \geq G_{\min} * (1 - a[m,n,t]);$  # Ελάχιστος αριθμός υπολειπόμενων ωρών συντήρησης

subject to h\_g {m in M, n in N, t in 1..T}:

$h[m,n,t] \leq g[m,n,t];$

subject to x\_y {m in M, n in N, t in 1..T}:

$x[m,n,t] \leq y[m,n,t];$

subject to initial\_a {m in M, n in N}:

$a[m,n,1] = A1[m,n];$

subject to initial\_y {m in M, n in N}:

$y[m,n,1] = Y1[m,n];$

subject to initial\_d {m in M, n in N}:

$d[m,n,1] = D1[m,n];$

subject to initial\_g {m in M, n in N}:

$g[m,n,1] = G1[m,n];$

subject to initial\_f {m in M, n in N}:

$$f[m,n,1] = F1[m,n];$$

subject to p\_constr {m in M, n in N,t in 1..T}:

$$y[m,n,t] + \text{BIG} * p[m,n,t] \leq \text{BIG}; \text{ \# if } y[m,n,t] > 0 \text{ then } p[m,n,t] = 0$$

subject to y\_drop {m in M, n in N,t in 1..T}:

$$a[m,n,t+1] \leq (y[m,n,t] - x[m,n,t]) * \text{BIG} + \text{BIG} * p[m,n,t];$$

subject to r\_constr {m in M, n in N,t in 1..T}:

$$g[m,n,t] + \text{BIG} * r[m,n,t] \leq \text{BIG}; \text{ \# if } g[m,n,t] > 0 \text{ then } r[m,n,t] = 0$$

subject to g\_drop {m in M, n in N,t in 1..T}:

$$1 - a[m,n,t+1] \leq (g[m,n,t] - h[m,n,t]) * \text{BIG} + \text{BIG} * r[m,n,t];$$

## Παράδειγμα

Σε αυτό το παράδειγμα μελετάται μια Μονάδα Α/Φ που αποτελείται από 3 Μοίρες, κάθε μία από τις οποίες έχει δυναμικότητα 8 αεροσκαφών σε χρονικό ορίζοντα 6 περιόδων. Στην αρχή του ορίζοντα σχεδιασμού υπάρχουν 3 αεροσκάφη στο σταθμό συντήρησης, ένα από κάθε μοίρα. Οι υπολειπόμενοι χρόνοι συντήρησης τους φαίνονται στον πίνακα 5. Ο πίνακας 2 παρουσιάζει τις προγραμματισμένες ώρες πτήσης για κάθε μοίρα και περίοδο, ο πίνακας 1 παρουσιάζει την χρονική χωρητικότητα του σταθμού συντήρησης για κάθε περίοδο και ο πίνακας 4 παρουσιάζει τις υπολειπόμενες ώρες πτήσης των αεροσκαφών την πρώτη περίοδο. Τέλος, οι πίνακες 3, 6, 7 παρουσιάζουν τις τιμές των δυαδικών μεταβλητών  $a_{mnt}$ ,

$d_{mnt}$ ,  $f_{mnt}$  αντίστοιχα. Οι τιμές των παραμέτρων του προβλήματος είναι  $G=320$ ,  $Y=300$ ,  $C=3$ ,  $J=100$ ,  $X_{\max}=50$ ,  $Y_{\min}=0.1$ ,  $G_{\min}=0.1$ ,  $\nu=6$ ,  $L=0.9$ ,  $U=1.1$ ,  $BIG=50000$ .

Πίνακας 1 :  $B_t$

		$t$					
		1	2	3	4	5	6
$B_t$		480	470	480	460	490	450

Πίνακας 2 :  $A_{mt}$

		$t$					
		1	2	3	4	5	6
$m$	1	150	130	150	140	150	160
	2	140	150	140	160	150	140
	3	140	160	150	140	160	130

Πίνακας 3 :  $A1_{mn}$

		$n$							
		1	2	3	4	5	6	7	8
$m$	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	2	1	0	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	0	1	1	1	1	1

Πίνακας 4 :  $Y1_{mn}$

		$n$							
		1	2	3	4	5	6	7	8
$m$	1	100	123	0	263	90	300	40	10
	2	133	0	150	34	10	150	114	218
	3	250	150	0	140	100	50	10	52



Πίνακας 5 :  $G1_{mn}$

		$n$							
		1	2	3	4	5	6	7	8
$m$	1	0	0	320	0	0	0	0	0
	2	0	200	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	100	0	0	0	0	0

Πίνακας 6:  $D1_{mn}$

		$n$							
		1	2	3	4	5	6	7	8
$m$	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 7 :  $F1_{mn}$

		$n$							
		1	2	3	4	5	6	7	8
$m$	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0

Η επίλυση του προβλήματος με τη χρήση του μοντέλου που αναπτύχθηκε και με εφαρμογή της AMPL(A Modeling Language for Mathematical Programming) μας δίνει τα εξής :

```
ILOG AMPL 9.100, licensed to "university-volos".
AMPL Version 20021038 (Linux 2.4.18-14)
ampl: model fleet.txt;
ampl: data fleet3.txt;
ampl: option cplex_options 'timing=1 integrality=0 mipgap=0 absmipgap=0';
ampl: solve;
ILOG CPLEX 9.100, licensed to "university-volos", options: e m b q
```

CPLEX 9.1.0: timing=1

integrality=0

mipgap=0

absmipgap=0

Times (seconds):

Input = 0.010999

**Solve = 42.7595**

Output = 0.012997

CPLEX 9.1.0: integer optimal with unscaled infeasibilities; **objective 22**

146106 MIP simplex iterations

1835 branch-and-bound nodes

8 integer variables rounded (maxerr = 4.44089e-15).

Assigning integrality = 0 might help.

Currently integrality = 0.

Στους πίνακες 8-35 παρουσιάζουμε τη λύση του παραδείγματος που εφαρμόστηκε στο μοντέλο. Αυτή είναι μόνο μία από τις πολλαπλές λύσεις που υπάρχουν.

**Πίνακας 8:**  $a_{nt}$

		$t$						
		1	2	3	4	5	6	7
$n$	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1	1
	3	0	0	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	0	1
	6	1	1	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	1	0	1	1
	8	1	1	1	1	1	1	1

Πίνακας 9 :  $a_{2nt}$ 

		$t$						
		1	2	3	4	5	6	7
$n$	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	0	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	0	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	1	1	1
	7	1	1	1	0	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1	1

Πίνακας 10 :  $a_{3nt}$ 

		$t$						
		1	2	3	4	5	6	7
$n$	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1	0
	3	0	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1	0
	5	1	1	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	0	0	0	1
	7	1	0	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1	1

Πίνακας 11:  $x_{1nt}$ 

		$t$					
		1	2	3	4	5	6
$n$	1	0	49,9	0	0	50	0
	2	0	50	25,1	38,9	0	0
	3	0	0	0	0	0	0
	4	45,1	0	50	50	50	50
	5	50	17,1	0	0	22,9	0
	6	0	0	50	50	12,1	50
	7	39,9	0	0	0,1	0	44
	8	0	0	9,9	0	0	0

Πίνακας 12 :  $x_{2nt}$ 

		$t$					
		1	2	3	4	5	6
$n$	1	0	0	0	50	50	0
	2	0	0	0	0	0	0
	3	0	1	50	0	0	0
	4	0	34	0	33,2	0	50
	5	9,9	0	0	0	0	0
	6	16,1	50	12	10,8	35	26
	7	50	50	14	0	0	50
	8	50	0	50	50	50	0

Πίνακας 13 :  $x_{3nt}$ 

		$t$					
		1	2	3	4	5	6
$n$	1	0	50	49,9	50	50	50
	2	0	50	35	0	15	50
	3	0	0	0	0	0	0
	4	0	47	0	26	50	17
	5	16,1	0	0	0	0	0
	6	49,9	0	0,1	0	0	0
	7	10	0	0	0	50	0
	8	50	1,9	50	50	0	0

Πίνακας 14 :  $y_{1nt}$ 

		$t$						
		1	2	3	4	5	6	7
$n$	1	100	100	50,1	50,1	50,1	0,1	0,1
	2	123	123	73	47,9	9	9	9
	3	0	0	300	300	300	300	300
	4	263	217,9	217,9	167,9	117,9	67,9	17,9
	5	90	40	22,9	22,9	22,9	0	300
	6	300	300	300	250	200	187,9	137,9
	7	40	0,1	0,1	0,1	0	300	256
	8	10	10	10	0,1	0,1	0,1	0,1

Πίνακας 15 :  $y_{2nt}$ 

		$t$						
		1	2	3	4	5	6	7
$n$	1	133	133	133	133	83	33	33
	2	0	300	300	300	300	300	300
	3	150	150	149	99	99	99	99
	4	34	34	0	300	266,8	266,8	216,8
	5	10	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	6	150	133,9	83,9	71,9	61,1	26,1	0,1
	7	114	64	14	0	300	300	250
	8	218	168	168	118	68	18	18

Πίνακας 16 :  $y_{3nt}$ 

		$t$						
		1	2	3	4	5	6	7
$n$	1	250	250	200	150,1	100,1	50,1	0,1
	2	150	150	100	65	65	50	0
	3	0	300	300	300	300	300	300
	4	140	140	93	93	67	17	0
	5	10	83,9	83,9	83,9	83,9	83,9	83,9
	6	50	0,1	0,1	0	0	0	300
	7	10	0	300	300	300	250	250
	8	152	102	100,1	50,1	0,1	0,1	0,1

Πίνακας 17:  $g_{1nt}$ 

		$t$						
		1	2	3	4	5	6	7
$n$	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0
	3	320	140	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	320	0
	6	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	320	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 18 :  $g_{2nt}$ 

		$t$						
		1	2	3	4	5	6	7
$n$	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	200	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	320	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	320	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 19 :  $g_{3nt}$ 

		$t$						
		1	2	3	4	5	6	7
$n$	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	320
	3	100	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	320
	5	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	320	180	10	0
	7	0	320	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 20 :  $h_{1nt}$ 

		$t$					
		1	2	3	4	5	6
$n$	1	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0
	3	180	140	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	320
	6	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	320	0
	8	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 21 :  $h_{2nt}$ 

		$t$					
		1	2	3	4	5	6
$n$	1	0	0	0	0	0	0
	2	200	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	320	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	320	0	0
	8	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 22 :  $h_{3nt}$ 

		$t$					
		1	2	3	4	5	6
$n$	1	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0
	3	100	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	140	170	10
	7	0	320	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 23 :  $f_{1nt}$ 

		$t$						
		1	2	3	4	5	6	7
$n$	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	1	0
	6	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	1	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 24 :  $f_{2nt}$ 

		$t$						
		1	2	3	4	5	6	7
$n$	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	1	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	1	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 25 :  $f_{3nt}$ 

		$t$						
		1	2	3	4	5	6	7
$n$	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	1
	3	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	1
	5	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	1	0	0	0
	7	0	1	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 26 :  $d_{1nt}$ 

		$t$						
		1	2	3	4	5	6	7
$n$	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	1	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	1
	6	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	1	0
	8	0	0	0	0	0	0	0



Πίνακας 27 :  $d_{2nt}$

		$t$						
		1	2	3	4	5	6	7
$n$	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	1	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	1	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	1	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 28 :  $d_{3nt}$

		$t$						
		1	2	3	4	5	6	7
$n$	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	1	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	1
	7	0	0	1	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 29 :  $q_t$

		$t$					
		1	2	3	4	5	6
$q$		1	0	0	1	1	0

Πίνακας 30 :  $p_{1nt}$ 

		$t$					
		1	2	3	4	5	6
$n$	1	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0
	3	1	1	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	1
	6	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	1	0
	8	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 31 :  $p_{2nt}$ 

		$t$					
		1	2	3	4	5	6
$n$	1	0	0	0	0	0	0
	2	1	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	1	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	1	0	0
	8	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 32 :  $p_{3nt}$ 

		$t$					
		1	2	3	4	5	6
$n$	1	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0
	3	1	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	1
	7	0	1	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 33 :  $r_{1nt}$ 

		$t$					
		1	2	3	4	5	6
$n$	1	0	1	1	0	0	0
	2	0	1	1	1	0	0
	3	0	0	0	0	0	0
	4	0	1	0	0	0	1
	5	0	1	1	1	1	0
	6	0	1	0	0	0	1
	7	1	1	0	1	0	0
	8	1	1	0	0	0	0

Πίνακας 34 :  $r_{2nt}$ 

		$t$					
		1	2	3	4	5	6
$n$	1	0	1	1	1	0	0
	2	0	0	0	0	0	0
	3	0	1	1	1	0	0
	4	1	1	0	0	0	0
	5	1	1	0	0	0	0
	6	0	1	1	1	0	0
	7	0	1	1	0	0	1
	8	0	1	0	0	1	1

Πίνακας 35 :  $r_{3nt}^*$ 

		$t$					
		1	2	3	4	5	6
$n$	1	0	1	0	0	1	1
	2	0	1	1	1	0	1
	3	0	0	0	0	0	0
	4	0	1	1	1	0	1
	5	0	1	1	0	0	0
	6	1	1	1	0	0	0
	7	1	0	0	0	0	0
	8	0	1	0	1	1	0

Σχολιάζοντας τα αποτελέσματα του παραδείγματος μέσα από την εφαρμογή του μοντέλου που αναπτύξαμε προκύπτουν τα εξής :

- Το A/Φ  $n_3$  της μοίρας  $m_1$  μπαίνει άμεσα στη συντήρηση την χρονική περίοδο  $t_1$  και θα παραμείνει στο υπόστεγο δύο περιόδους. Το A/Φ  $n_5$  της ίδιας Μοίρας θα εισέλθει για συντήρηση την περίοδο  $t_6$  και θα παραμείνει σε αυτή μία χρονική περίοδο. Επίσης, το A/Φ  $n_7$  της ίδιας Μοίρας θα εισέλθει για συντήρηση την περίοδο  $t_5$  και θα παραμείνει στο υπόστεγο μία περίοδο.

- Το A/Φ  $n_2$  της μοίρας  $m_2$  είναι ήδη στη συντήρηση την χρονική περίοδο  $t_1$  (και μάλιστα του απομένουν ακόμα 200 εργατώρες συντήρησης) και θα παραμείνει στο υπόστεγο 1 περίοδο. Το A/Φ  $n_4$  της μοίρας  $m_2$  θα πρέπει να προγραμματιστεί για είσοδο στη συντήρηση την χρονική περίοδο  $t_3$  και θα παραμείνει στο υπόστεγο μία περίοδο. Όμοια το A/Φ  $n_7$  της ίδιας Μοίρας θα εισέλθει για συντήρηση την περίοδο  $t_4$  και θα παραμείνει σε αυτή μία χρονική περίοδο.

- Το A/Φ  $n_3$  της μοίρας  $m_3$  είναι ήδη στη συντήρηση την χρονική περίοδο  $t_1$  (και μάλιστα του απομένουν ακόμα 100 εργατώρες συντήρησης) και θα παραμείνει στο υπόστεγο μία περίοδο. Επίσης το A/Φ  $n_7$  της ίδιας Μοίρας θα εισέλθει για συντήρηση την περίοδο  $t_2$  και θα παραμείνει σε αυτή μία περίοδο. Το A/Φ  $n_6$  της ίδιας Μοίρας θα εισέλθει για συντήρηση την περίοδο  $t_4$  και θα παραμείνει σε αυτή 3 περιόδους. Η μακρά παραμονή του A/Φ στη συντήρηση δικαιολογείται από το γεγονός ότι άλλα αεροσκάφη απορροφούσαν εργατώρες από τη συντήρηση. Τέλος, τα A/Φ  $n_2$  και  $n_4$  θα εισέλθουν στην συντήρηση την περίοδο  $t_7$ .

- Πρόθεση του μοντέλου είναι η συντήρηση να εξαντλεί τις δυνατότητες της

όσον αφορά τις εργατώρες που είναι διαθέσιμη να προσφέρει. Αυτό βλέπουμε ότι γίνεται με μεγάλη ακρίβεια στο συγκεκριμένο παράδειγμα για τις δύο από τις έξι περιόδους. Την δεύτερη, την τρίτη, την πέμπτη και την έκτη περίοδο διαπιστώνουμε ότι αυτό δε συμβαίνει. Αν και η συντήρηση έχει στη διάθεση της 470, 480, 490 και 450 εργατώρες για κάθε περίοδο, από αυτές που αναφέραμε παραπάνω, εργάζεται μόνο τις 460, 320, 470 και 330 από αυτές. Δεν πρόκειται όμως για λάθος μιας και το σύνολο των εργατωρών που απομένουν, στα Α/Φ που βρίσκονται στη συντήρηση τις αντίστοιχες περιόδους, είναι 460, 320, 470 και 330 ώρες αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει επίσης ότι η συντήρηση δουλεύει 310 ώρες λιγότερο.

- Οι πίνακες 7-9 μας δείχνουν τις υπολειπόμενες ώρες πτήσεις των αεροσκαφών για κάθε μοίρα. Οι τιμές των πινάκων αυτών προκύπτουν από τη λειτουργία του περιορισμού (5). Οι τιμές των ωρών πτήσης για κάθε περίοδο φαίνονται στους πίνακες 4-6.

- Η ελάχιστη διαθεσιμότητα ανά μοίρα και ανά περίοδο είναι 6 Α/Φ επί συνόλου 8, ποσοστό δηλαδή 75%, αρκετά ικανοποιητικό.

- Η ελάχιστη διαθεσιμότητα ανά περίοδο και για τις τρεις μοίρες είναι 22 Α/Φ επί συνόλου 24, ποσοστό δηλαδή 91,6%, πολύ ικανοποιητικό. Η διαθεσιμότητα της πρώτης περιόδου είναι 21 αλλά δεν την λαμβάνουμε υπόψιν γιατί δεν μπορεί να επηρεασθεί.

- Ο ελάχιστος αριθμός υπολειπόμενων ωρών πτήσης ανά μοίρα και ανά περίοδο είναι 700 ώρες. Ο μέγιστος αριθμός υπολειπόμενων ωρών είναι 1178 ώρες.

- Ο ελάχιστος αριθμός υπολειπόμενων ωρών πτήσης όλων των Α/Φ ανά

περίοδο είναι 2659.1 ώρες. Δεν λαμβάνουμε υπόψη τον αριθμό υπολειπόμενων ωρών της πρώτης περιόδου του ορίζοντα σχεδιασμού γιατί αυτός δεν μπορεί να επηρεασθεί. Είναι ένας αρκετά μεγάλος αριθμός που μπορεί να καλύψει, εκτός από τις πάγιες ανάγκες, σχεδόν όλες τις ανάγκες που μπορεί να προκύψουν.

### 5.3 Συνέχεια Μοντέλου Σχεδιασμού Πτήσεων και Συντηρήσεων Αεροσκαφών

Το μοντέλο μας, όπως έχουμε ήδη αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο, έχει την ικανότητα να ανταποκρίνεται σε εφαρμογές μακροπρόθεσμου σχεδιασμού. Τον τρόπο με τον οποίο γίνεται αυτό θα τον δείξουμε με βάση την παραπάνω εφαρμογή.

Υποθέτουμε ότι το παραπάνω παράδειγμα μας ζητούσε τον σχεδιασμό πτήσεων και συντηρήσεων αεροσκαφών για ένα ορίζοντα σχεδιασμού 12 περιόδων. Αυτό που θα κάναμε αν χρησιμοποιούσαμε το παλιό μοντέλο ήταν να ορίσουμε τον ορίζοντα σχεδιασμού στις 12 περιόδους. Αυτό το γεγονός θα μας οδηγούσε σε μια πολύ μεγάλη αύξηση του χρόνου επίλυσης του προβλήματος σε σημείο που να μην είναι εφικτό να βρούμε λύση. Αυτό συμβαίνει λόγω της αύξησης του μεγέθους του προβλήματος και της δυσκολίας των συνηθισμένων υπολογιστών να ανταποκριθούν σε τόσο μεγάλα προβλήματα.

Εκτός από τη δυσκολία που θα συναντήσουμε από υπολογιστική άποψη, ένα άλλο θέμα που προκύπτει είναι και ότι ένα διάστημα τέτοιας χρονικής διάρκειας δεν είναι δόκιμο για τον εξής λόγο :

- Τα περισσότερα προγράμματα τέτοιου είδους γίνονται συνήθως για μικρότερες χρονικές περιόδους από 12 μήνες διότι είναι μια αρκετά μεγάλη περίοδος

και υπάρχουν γεγονότα που μπορεί να συμβούν τα οποία είναι αδύνατον να προβλεφθούν. Ο ορίζοντας σχεδιασμού των 6 μηνών είναι ο πιο συνηθισμένος.

Σε αντίθεση με το παλιό μοντέλο το νέο έχει την ικανότητα να σχεδιάζει για μεγαλύτερους ορίζοντες. Αυτό που θα κάνουμε είναι να λύσουμε το προηγούμενο παράδειγμα για 6 περιόδους, όπως κάναμε και πριν. Αυτομάτως έχουμε το σχέδιο πτήσης και συντήρησης αεροσκαφών για τις πρώτες 6 περιόδους. Από τη λύση αυτή όμως προκύπτουν και οι τιμές κάποιων παραμέτρων για την 7<sup>η</sup> περίοδο. Αυτές οι παράμετροι είναι οι αναγκαίες που χρειάζονται για να λύσουμε το παράδειγμα για άλλες 6 περιόδους, δηλαδή για τις περιόδους 7-12. Εδώ βλέπουμε ότι υπήρχε εξαρχής η πρόβλεψη του να μπορεί το μοντέλο να ανταποκριθεί σε προβλήματα μακροχρόνιου σχεδιασμού. Με αυτόν τον τρόπο καταφέρνουμε να λύσουμε το παράδειγμα των 12 περιόδων. Ανάλογα μπορούν να λυθούν και μεγαλύτερα προβλήματα.

Όλα τα δεδομένα για το παράδειγμα των περιόδων 7-12 είναι ίδια με αυτά του παραδείγματος των περιόδων 1-6 εκτός από τα  $Al_{mn}$ ,  $Yl_{mn}$ ,  $G1_{mn}$ ,  $D1_{mn}$ ,  $F1_{mn}$ . Παρακάτω παραθέτουμε, χάριν συντομίας, μόνο τα πιο πάνω δεδομένα του παραδείγματος για τις περιόδους 7-12 :

**Πίνακας 36 :**  $Al_{mn}$

		$n$							
		1	2	3	4	5	6	7	8
$m$	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1	1	1
	3	1	0	1	0	1	1	1	1

Πίνακας 37 :  $Y1_{mn}$

		$n$							
		1	2	3	4	5	6	7	8
$m$	1	0,1	9	300	17,9	300	137,9	256	0,1
	2	33	300	99	216,8	0,1	0,1	250	18
	3	0,1	0	300	0	83,9	300	250	0,1

Πίνακας 38 :  $G1_{mn}$

		$n$							
		1	2	3	4	5	6	7	8
$m$	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	320	0	320	0	0	0	0

Πίνακας 39 :  $D1_{mn}$

		$n$							
		1	2	3	4	5	6	7	8
$m$	1	0	0	0	0	1	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	1	0	0

Πίνακας 40 :  $F1_{mn}$

		$n$							
		1	2	3	4	5	6	7	8
$m$	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	1	0	1	0	0	0	0



Η επίλυση του προβλήματος με τη χρήση του μοντέλου που αναπτύχθηκε και με εφαρμογή της AMPL(A Modeling Language for Mathematical Programming) μας δίνει τα εξής αποτελέσματα ( Παραθέτουμε μόνο τα αποτελέσματα της μοίρας ml, χάριν συντομίας ) :

ILOG AMPL 9.100, licensed to "university-volos".

AMPL Version 20021038 (Linux 2.4.18-14)

**ampl: model fleet.txt;**

**ampl: data fleet3b.txt;**

**ampl: option cplex\_options 'timing=1 integrality=0 mipgap=0 absmipgap=0';**

**ampl: solve;**

ILOG CPLEX 9.100, licensed to "university-volos", options: e m b q

CPLEX 9.1.0: timing=1

integrality=0

mipgap=0

absmipgap=0

Times (seconds):

Input = 0.010999

**Solve = 3.9334**

Output = 0.013998

CPLEX 9.1.0: integer optimal with unscaled infeasibilities; **objective 22**

8206 MIP simplex iterations

218 branch-and-bound nodes

8 integer variables rounded (maxerr = 4.44089e-15).

Assigning integrality = 0 might help.

Currently integrality = 0.

Πίνακας 41 :  $a_{int}$ 

		$t$						
		1	2	3	4	5	6	7
$n$	1	1	1	1	1	1	0	1
	2	1	1	0	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1	1
	5	1	1	1	1	1	1	1
	6	1	1	1	1	0	1	1
	7	1	1	1	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1	1

Πίνακας 42 :  $x_{int}$ 

		$t$					
		1	2	3	4	5	6
$n$	1	0	0	0	0	0,1	0
	2	0	9	0	0	34,9	0
	3	0	8	50	50	50	50
	4	0	0	0	0	0	17,8
	5	35	50	50	0	0	26,2
	6	50	50	11,9	26	0	0
	7	50	0	23,1	50	50	50
	8	0	0	0	0	0	1

Πίνακας 43 :  $y_{int}$ 

		$t$						
		1	2	3	4	5	6	7
$n$	1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	300
	2	9	9	0	300	300	265,1	265,1
	3	300	300	292	242	192	142	92
	4	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	0,1
	5	300	265	215	165	165	165	138,8
	6	137,9	87,9	37,9	26	0	300	300
	7	256	206	206	182,9	132,9	82,9	32,9
	8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Πίνακας 44 :  $g_{nt}$ 

		$t$						
		1	2	3	4	5	6	7
$n$	1	0	0	0	0	0	320	0
	2	0	0	320	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	320	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 45 :  $h_{nt}$ 

		$t$					
		1	2	3	4	5	6
$n$	1	0	0	0	0	0	320
	2	0	0	320	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	320	0
	7	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 46 :  $f_{nt}$ 

		$t$						
		1	2	3	4	5	6	7
$n$	1	0	0	0	0	0	1	0
	2	0	0	1	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	1	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 47 :  $d_{1nt}$

		$t$						
		1	2	3	4	5	6	7
$n$	1	0	0	0	0	0	0	1
	2	0	0	0	1	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0
	5	1	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	1	0
	7	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 48 :  $q_t$

		$t$					
		1	2	3	4	5	6
$q$		1	1	0	0	1	1

Πίνακας 49 :  $p_{1nt}$

		$t$					
		1	2	3	4	5	6
$n$	1	0	0	0	0	0	1
	2	0	0	1	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 50 :  $r_{int}$ 

		$t$					
		1	2	3	4	5	6
$n$	1	1	1	0	0	1	0
	2	1	1	0	0	0	0
	3	0	1	0	0	0	1
	4	1	1	0	1	0	0
	5	0	1	0	0	0	1
	6	0	1	1	1	0	0
	7	0	1	0	0	0	1
	8	1	1	0	0	0	0

#### 5.4 Συμπεράσματα

Σε αυτό το Κεφάλαιο παρατηρούμε την ορθή λειτουργία του μοντέλου. Αυτή φαίνεται ξεκάθαρα μέσα από τα αποτελέσματα. Είναι ορθή διότι ύστερα από διαδοχικούς ελέγχους των αποτελεσμάτων μας δεν παρατηρήσαμε καμία δυσλειτουργία. Η ροή αυτών ήταν βάσει των περιορισμών του μοντέλου και δεν παρέκλιναν πουθενά. Άρα κρίνουμε το μοντέλο μας επιτυχημένο ως προς τους βασικούς στόχους που είχαν τεθεί.

Επιπλέον σημαντική κατάκτηση αυτού του μοντέλου είναι η συνέχεια του, δηλαδή η δυνατότητα που έχει στο να τρέχει εφαρμογές μεγαλύτερου χρονικού ορίζοντα. Αυτό είναι πολύ σημαντικό αν σκεφτεί κανείς ότι στο προηγούμενο μοντέλο δεν υπήρχε δεν υπήρχε πρόβλεψη για αυτό το ζήτημα.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΤΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΕΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ**

### *6.1 Γενικά*

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζουμε το σχολιασμό του μοντέλου. Ουσιαστικά εμβαθύνουμε στο μοντέλο και τα θέματα που μας απασχολούν εδώ είναι προβληματισμοί που δεν προκύπτουν από την εφαρμογή του μοντέλου αλλά από τις διαδικασίες σχηματισμού του. Οι προβληματισμοί αυτοί παρατίθενται παρακάτω. Αναλυτικά, στο υποκεφάλαιο 6.2 δικαιολογούμε την επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης και τη συγκρίνουμε με εναλλακτικές. Κατόπιν, στο υποκεφάλαιο 6.3 ασχολούμαστε με την ευελιξία του μοντέλου και αναπτύσσουμε τους τρόπους με τους οποίους η δυνατότητα εφαρμογής της μπορεί να ενισχυθεί. Τέλος, στο υποκεφάλαιο 6.4 συζητάμε μερικά υπολογιστικά ζητήματα, σχετικά με την προσπάθεια που το μοντέλο καταβάλλει προκειμένου να φθάσει σε μια βέλτιστη λύση.

### *6.2 Καταλληλότητα της αντικειμενικής συνάρτησης*

Η επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης του μοντέλου είναι κρίσιμη. Στα πολεμικά θέματα, η ετοιμότητα της πτέρυγας μάχης να ανταποκριθεί στις εξωτερικές απειλές μετριέται με δύο τρόπους : Ως συνολικός αριθμός αεροσκαφών που είναι διαθέσιμα να πετάξουν και ως συνολικός υπολειπόμενος χρόνος πτήσης όλων των διαθέσιμων αεροσκαφών. Ύστερα από αρκετές συζητήσεις με στρατιωτικούς ειδικούς σχετικά με το θέμα, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι ο συνολικός αριθμός

διαθέσιμων αεροσκαφών είναι καταλληλότερος ως αντικειμενική συνάρτηση για τρεις κύριους λόγους, που είναι οι εξής :

- Ο πρώτος είναι το ότι, σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, μόνο η άμεση πολύ μικρή περίοδος μετά από την εκδήλωση της έκτακτης ανάγκης είναι κρίσιμη. Τα γεγονότα που θα διαδραματιστούν κατά τη διάρκεια αυτής της πολύ μικρής χρονικής περιόδου θα καθορίσουν εάν η κρίση έχει διαχειριστεί επιτυχώς. Σε αυτήν την περίπτωση, η ύπαρξη ενός πολύ μεγάλου συνολικού υπολειπόμενου χρόνου πτήσης δεν προσφέρει πολύ στην ετοιμότητα, δεδομένου ότι μόνο ένα μικρό ποσοστό αυτού του χρόνου είναι κρίσιμο.

- Ο δεύτερος λόγος είναι ότι ο υπολειπόμενος χρόνος πτήσης κάθε μοίρας είναι περίπου καθορισμένος από τις απαιτήσεις του προγράμματος που εκδίδονται από τον διοικητή της πτέρυγας. Επομένως, δεν είναι πολύ ενδιαφέρον να προσπαθήσουμε να βελτιστοποιήσουμε μια ποσότητα που ξέρουμε εκ των προτέρων ότι θα πάρει τιμές μέσα σε ένα περιορισμένο διάστημα.

- Ο τρίτος λόγος είναι ότι η διατήρηση ενός αποδεκτού επιπέδου ετοιμότητας από την άποψη του συνολικού υπολειπόμενου χρόνου πτήσης επιτυγχάνεται μέσω των παραμέτρων  $J$  και  $\nu$ . Παραδείγματος χάριν, στο πρόβλημα που επιλύθηκε παραπάνω, με  $M=3$ ,  $J=100$  και  $\nu=6$ , το μοντέλο εξασφαλίζει ότι σε οποιαδήποτε περίοδο θα υπάρξει ένας συνολικός υπολειπόμενος χρόνος πτήσης ο οποίος θα είναι τουλάχιστον ίσως με  $(3)(6)(100)=1800$  ώρες.

Εκτός από την αντικειμενική συνάρτηση  $Z_1$  (μεγιστοποίηση του ελάχιστου αριθμού διαθέσιμου αεροσκαφών της πτέρυγας σε οποιαδήποτε περίοδο) που

χρησιμοποιήσαμε στην εφαρμογή του μοντέλου, εμείς επίσης λύσαμε το προηγούμενο πρόβλημα χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις :

- $z_2$  = μεγιστοποίηση του ελάχιστου αριθμού διαθέσιμων αεροσκαφών σε οποιαδήποτε μοίρα και σε οποιαδήποτε περίοδο (δηλ. μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας των μοιρών και όχι της πτέρυγας),
- $z_3$  = μεγιστοποίηση του ελάχιστου συνολικού υπολειπόμενου χρόνου πτήσης σε οποιαδήποτε περίοδο,
- $z_4$  = μεγιστοποίηση του ελάχιστου υπολειπόμενου χρόνου πτήσης οποιασδήποτε μοίρας σε οποιαδήποτε περίοδο.

Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 49. Σε αυτόν τον πίνακα βλέπουμε τις τιμές κάθε μίας εκ των τεσσάρων παραμέτρων όταν κάθε μία από αυτές χρησιμοποιείται σαν την αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου.

		Τιμές				
		z1	z2	z3	z4	Time(sec)
Αντικειμενικές Συναρτήσεις	z1	<b>22</b>	6	2659.1	700	42,7595
	z2	21	<b>7</b>	2648	722	2,56161
	z3	21	6	<b>2800</b>	737	0,941857
	z4	21	6	2714.3	<b>791</b>	9,15361

**Πίνακας 51 : Σύγκριση αντικειμενικών συναρτήσεων**

Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα που παραθέσαμε στον πίνακα 49, για αυτήν την συγκεκριμένη περίπτωση, η λύση που προέκυψε από τη χρησιμοποίηση της  $z_1$  ως



αντικειμενική συνάρτηση δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα για τη διαθεσιμότητα της πτέρυγας, ενώ η λύση που προέκυψε από τη χρησιμοποίηση της  $Z_2$  δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα για τη διαθεσιμότητα της κάθε μοίρας. Επιπλέον, η λύση που προέκυψε από τη χρήση της  $z_3$  δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα για τις ελάχιστες υπολειπόμενες ώρες πτήσης της πτέρυγας ενώ η  $Z_4$  δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα για τις ελάχιστες υπολειπόμενες ώρες πτήσης για κάθε μοίρα. Στην τελευταία στήλη του πίνακα παρουσιάζουμε τους χρόνους που χρειάστηκε το μοντέλο προκειμένου να δώσει λύση σε κάθε περίπτωση. Συμπερασματικά, η επιλογή μίας εκ των τεσσάρων λύσεων πρέπει να γίνει ανάλογα με την σημαντικότητα αυτών.

### 6.3 Ενελιζία του Μοντέλου

Υπάρχουν μερικά θέματα που πρέπει να τεθούν υπό σκέψη κατά την εφαρμογή τροποποιήσεων στο μοντέλο. Το πρώτο είναι ότι ένας μεγάλος αριθμός περιορισμών μπορεί ενδεχομένως να οδηγήσει σε μη εφικτές περιπτώσεις εφαρμογών. Αυτό σε καμία περίπτωση δεν αντικρούει την ορθότητα του μοντέλου. Το μόνο που δηλώνει είναι ότι οι περιορισμοί που έχουν εισαχθεί δεν μπορούν να ικανοποιούνται όλοι ταυτόχρονα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο χρήστης θα πρέπει να γυρίσει πίσω και να χαλαρώσει τους περιορισμούς που επιδέχονται αλλαγές, προκειμένου να αποκτηθεί μία εφικτή λύση.

Όπως αναφέραμε αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 5.3 μία από τις ιδιότητες του μοντέλου είναι η συνέχεια του, δηλαδή στο τέλος του τρέχοντος χρονικού ορίζοντα, το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί πάλι για να εκδώσει το πρόγραμμα για τον επόμενο

ορίζοντα σχεδιασμού. Στο ανωτέρω πρόβλημα, η εφαρμογή του μοντέλου επιστρέφει μια λύση με μια αντικειμενική συνάρτηση με τιμή 22. Αυτό σημαίνει ότι εάν αυτό το πρόγραμμα ακολουθείται, θα υπάρξουν τουλάχιστον 22 αεροσκάφη διαθέσιμα στη πτέρυγα σε κάθε έναν από τους επόμενους 6 μήνες επίσης.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, μία μοναδική εφαρμογή του μοντέλου δεν θα αποκαλύψει όλες τις πτυχές του προβλήματος. Προκειμένου να αποφευχθεί η παράβλεψη των σημαντικών ζητημάτων, ο χρήστης πρέπει πάντα να πραγματοποιεί πρόσθετες αναλύσεις στο ίδιο πρόβλημα, όπως αυτές των προηγούμενων υποενοτήτων. Σε οποιοδήποτε σημείο, εάν υπάρξει μια απροσδόκητη αλλαγή στη κατάσταση του συστήματος (παραδείγματος χάριν εάν ένα αεροσκάφος γίνει ξαφνικά μη διαθέσιμο), ο χρήστης μπορεί να εφαρμόσει το μοντέλο από εκείνο το σημείο και έπειτα, αφού πρώτα ενσωματώσει όλες τις αλλαγές που έχουν προκύψει.

#### 6.4 Υπολογιστικές Εκτιμήσεις

Το μοντέλο που εισαγάγαμε είναι ένα μικτό ακέραιο μοντέλο βελτιστοποίησης και η υπολογιστική προσπάθεια που απαιτείται για να βρει μια βέλτιστη λύση εξαρτάται έντονα από το μέγεθος και τις παραμέτρους της συγκεκριμένης περίπτωσης. Σε πολλές περιπτώσεις, ο μεγάλος αριθμός περιορισμών μπορεί να οδηγήσει στη βέλτιστη λύση πολύ γρήγορα, εξαιτίας του ότι η εφικτή περιοχή που καθορίζεται από αυτούς τους περιορισμούς είναι μικρή. Σε άλλες περιπτώσεις, αυτό μπορεί να μην εμφανιστεί, λόγω του ότι υπάρχει μια μεγαλύτερη εφικτή περιοχή και πολλοί οι διαφορετικοί συνδυασμοί μεταβλητών απόφασης που πρέπει να συγκριθούν. Για αυτόν τον λόγο, το μέγεθος του προβλήματος,

από μόνο του, δεν είναι ενδεικτικό του χρόνου που απαιτείται για να φθάσει σε μια βέλτιστη λύση.

Τα διάφορα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι παράμετροι με μεγάλη επιρροή στην υπολογιστική προσπάθεια είναι οι προγραμματισμένοι χρόνοι πτήσης ( $A_{mt}$ ), η χωρική ( $C$ ) και χρονική ( $B_t$ ) δυναμικότητα του σταθμού συντήρησης, ο ελάχιστος μέσος υπολειπόμενος χρόνος πτήσης ανά αεροσκάφος ( $J$ ), ο ελάχιστος αριθμός διαθέσιμων αεροσκαφών ανά μοίρα για κάθε χρονική περίοδο ( $\nu$ ) καθώς και η μεταβλητή  $BIG$ . Βέβαια, μια αύξηση στο μέγεθος του προβλήματος, οδηγεί γενικά, σε μεγαλύτερη υπολογιστική προσπάθεια, μιας και ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης αυξάνεται σημαντικά. Η λύση της εφαρμογής του 5<sup>ου</sup> κεφαλαίου διήρκησε 43 δευτερόλεπτα σε έναν επεξεργαστή Pentium IV/2.5 GHz, χρησιμοποιώντας την AMPL/CPLEX ως μικτό ακέραιο λογισμικό βελτιστοποίησης.

#### 6.5 Συμπεράσματα-Προτάσεις για Μελλοντική Βελτίωση

Εισαγάγαμε ένα μοντέλο βελτιστοποίησης μικτών ακεραίων για το σχεδιασμό πτήσεων και συντηρήσεων πολεμικών αεροσκαφών. Το μοντέλο αναπτύχθηκε προς χρήση από την Ελληνική Πολεμική Αεροπορία. Η ετοιμότητα ανταπόκρισης σε εξωτερικές απειλές μεγιστοποιείται στην αντικειμενική συνάρτηση. Όλες οι πτυχές του προβλήματος ενσωματώνονται και ο μεγάλος αριθμός μεταβλητών απόφασης ενισχύει την ευελιξία του μοντέλου.

Παρουσιάσαμε επίσης μια εφαρμογή του μοντέλου σε μια πραγματική

περίπτωση μαζί με τον, σε βάθος, σχολιασμό της συμπεριφοράς του μοντέλου. Πιστεύουμε ότι η μελλοντική έρευνα πρέπει να κατευθυνθεί προς την ανάπτυξη αποδοτικών ευρετικών αλγορίθμων για τη λύση αυτού του προβλήματος προκειμένου να καταστήσουμε τη λύση μεγαλύτερων προβλημάτων πιο προσιτή.

Αυτό είναι μόνο ένα από τα πολλά προβλήματα που προκύπτουν σε πολεμικές εφαρμογές τα οποία αντιμετωπίζονται στην πράξη με απλούς κανόνες απόφασης, μη βασισμένους σε αναλυτικές μεθοδολογίες. Πιστεύουμε ότι η μελλοντική έρευνα πρέπει να κατευθυνθεί πιο εντατικά προς την εύρεση των αναλυτικών εργαλείων για τέτοια προβλήματα, λόγω της σημασίας των σχετικών ζητημάτων και του σοβαρού αντίκτυπου που οι σχετικές αποφάσεις μπορούν να έχουν. Στην πραγματικότητα, απ' όσο γνωρίζουμε, αυτή είναι μία από τις λίγες προσπάθειες, που αναφέρονται στη βιβλιογραφία, που εξετάζει ένα κοινό πρόβλημα λήψης απόφασης σχετικά με τον προγραμματισμό πολεμικών αεροσκαφών κατά αναλυτικό τρόπο.

## Βιβλιογραφία

- [1] Arguello MF, Bard JF and Yu G (1997). Models and methods for managing airline irregular operations aircraft routing. In Yu G, (editor), Operations Research in the Airline Industry, Kluwer Academic Publishers, Boston 1-45.
- [2] Barnhart C, Boland NL, Clarke LW, Johnson EL, Nemhauser GL and Shenoi RG (1998). "Flight string models for aircraft fleetting and routing", Transportation Science 32 (3): 208-220.
- [3] Beasley JE, Krishnamoorthy M, Sharaiha YM and Abramson D (2000). "Scheduling aircraft landings - The static case", Transportation Science 34 (2): 180-197.
- [4] Clarke LW, Hane CA, Johnson EL and Nemhauser GL (1996). "Maintenance and Crew Considerations in Fleet Assignment", Transportation Science 30 (3): 249-260.
- [5] Clarke L, Johnson E, Nemhauser G and Zhongxi Z (1997). "The aircraft rotation problem", Annals of Operations Research 69: 33-46.
- [6] Dijkstra MC, Kroon LG, Salomon M, Vannunen J and Vanwassenhove LN (1994). "Planning for size and organization of KLM's Aircraft Maintenance Personnel", Interfaces 24 (6): 47-58.
- [7] Ernst AT, Krishnamoorthy M and Storer RH (1999). "Heuristic and exact algorithms for scheduling aircraft landings", Networks 34 (3): 229-241.
- [8] Feo TA and Bard JF (1989). "Flight scheduling and maintenance base planning", Management Science 35:1415-1432.

- [9] Friend CH (1995). Aircraft Maintenance Management, Longman-Scientific Technical, England.
- [10] Graves GW, McBride RD, Gershkoff I, Anderson D and Mahidhara D (1993) "Flight Crew Scheduling", Management Science 39 (6): 736-745.
- [11] Gopalan R and Talluri KT (1998a). "The aircraft maintenance routing problem", Operations Research 46 (2): 260-271.
- [12] Gopalan R and Talluri KT (1998b). "Mathematical models in airline schedule planning: A survey", Annals of Operations Research 76: 155-185.
- [13] Keskinocak P and Tayur S (1998). "Scheduling of Time-Shared Jet Aircraft", Transportation Science 32 (3): 277-294.
- [14] Klabjan D, Johnson EL, Nemhauser GL, Gelman E and Ramaswamy S (2002). "Airline crew scheduling with time windows and plane-count constraints", Transportation Science 36 (3): 337-348.
- [15] Kurokawa T and Takeshita K (2004). "Air Transportation Planning Using Neural Networks as an Example of the Transportation Squadron in the Japan Air Self-Defense Force", Systems and Computers in Japan 35 (12): 1223-1232.
- [16] Qi XT, Bard JF and Yu G (2004). "Class scheduling for pilot training", Operations Research 52 (1): 148-162.
- [17] Rushmeier RA and Kontogiorgis SA (1997). "Advances in the optimization of airline fleet assignment", Transportation Science 31 (2): 159-169.
- [18] Sriram C and Haghani A (2003). "An optimization model for aircraft

maintenance scheduling and re-assignment”, Transportation Research Part A : Policy and Practice 37 (1): 29-48.

[19] Samaranayake P, Lewis GS, Woxvold ERA and Toncich D (2002). “Development of engineering structures for scheduling and control of aircraft maintenance”, International Journal of Operations & Production Management 22 (8): 843-867.

[20] Solanki RS and Southworth F (1991). "An Execution Planning Algorithm for Military Airlift", Interfaces 21 (4): 121-131.

[21] Talluri KT (1998). "The four-day aircraft maintenance routing problem" Transportation Science 32 (1): 43-53.

[22] Yan S and Lin CG (1997). "Airline scheduling for the temporary closure of airports", Transportation Science 31 (1): 72-82.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074732



